

文章编号: 1672-8785(2013)04-0028-06

4 路长积分时间 CCD 成像电路的设计与实现

蔡模琴^{1,3} 程玉兰¹ 孙德新^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于 CCD47-20 和 CCD55-30 探测器设计了一种 4 路探测器成像电路。由于积分时间长, 该系统可以在弱光条件下实现高灵敏度成像。建立了探测器的驱动电路模型, 分析了 CCD 探测器对驱动的要求, 以选择合适的驱动芯片; 在分析探测器噪声特性的基础上, 通过相关双采样法和合理的滤波器设置抑制了电路噪声。针对 4 路探测器信号处理电路之间的串扰问题进行了分析和对比, 为合理的 PCB 布局布线提供了参考。该成像电路与商用镜头搭配使用后已成功获取了微光条件下的低噪声外景图像。

关键词: CCD 驱动; 噪声抑制; PCB 布线

中图分类号: TN386.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.04.006

Design and Implementation of 4-channel Long Integration Time CCD Imaging Circuit

CAI Mo-qin^{1,3}, CHENG Yu-lan¹, SUN De-xin^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A 4-channel detector imaging circuit based on a CCD47-20 and a CCD55-30 is designed. Because of long integration time, the system can implement high sensitivity imaging under the low-light condition. To choose appropriate driving devices, the driving circuit model for the detector is established and the driving requirements of CCD detectors are analyzed. After the noise characteristics of the detectors are analyzed, the circuit noise is suppressed by using the Correlated Double Sampling (CDS) and a reasonable filter. The noise interference among the 4 channel signal processing circuits is compared. The result is helpful to the reasonable PCB routing. This imaging circuit is used with a commercial camera lens and low noise images are obtained successfully under the low-light condition.

Key words: CCD driver; noise suppression; PCB routing

0 引言

自从 CCD 诞生以来, CCD 技术发展迅速。

目前, CCD 已经成功应用于遥感、航天、工业

检测、安全监视和商业相机等领域。与 CMOS 探测器相比, CCD 探测器具有量子效率高、均匀性好以及动态范围大等优点。

为了提高探测器对弱光的灵敏度, 通常采

收稿日期: 2013-03-20

作者简介: 蔡模琴 (1987-), 女, 福建莆田人, 硕士研究生, 主要从事 CCD 驱动与信号处理技术研究。

E-mail: caimoqin@mail.ustc.edu.cn

用延长积分时间的方法。在本文设计中, 积分时间在 500 ms、1 s、2 s、4 s 之间可调。选用的探测器为英国 E2V 公司生产的 CCD47-20 和 CCD55-30 探测器, 其相关参数见表 1。

表 1 CCD 参数

参数	型号	
	CCD47-20	CCD55-30
面阵	1024×1024	1242×575
满阱容量	120 ke ⁻	600 ke ⁻
灵敏度	4.5 μv/e ⁻	3 μv/e ⁻
读出速率	2.5 M	2 M
读出噪声	6.0 e ⁻ rms	11.0 e ⁻ rms
暗电流	10 ke ⁻ /pixel/s	12 ke ⁻ /pixel/s

1 电路总体设计

1.1 总体框架

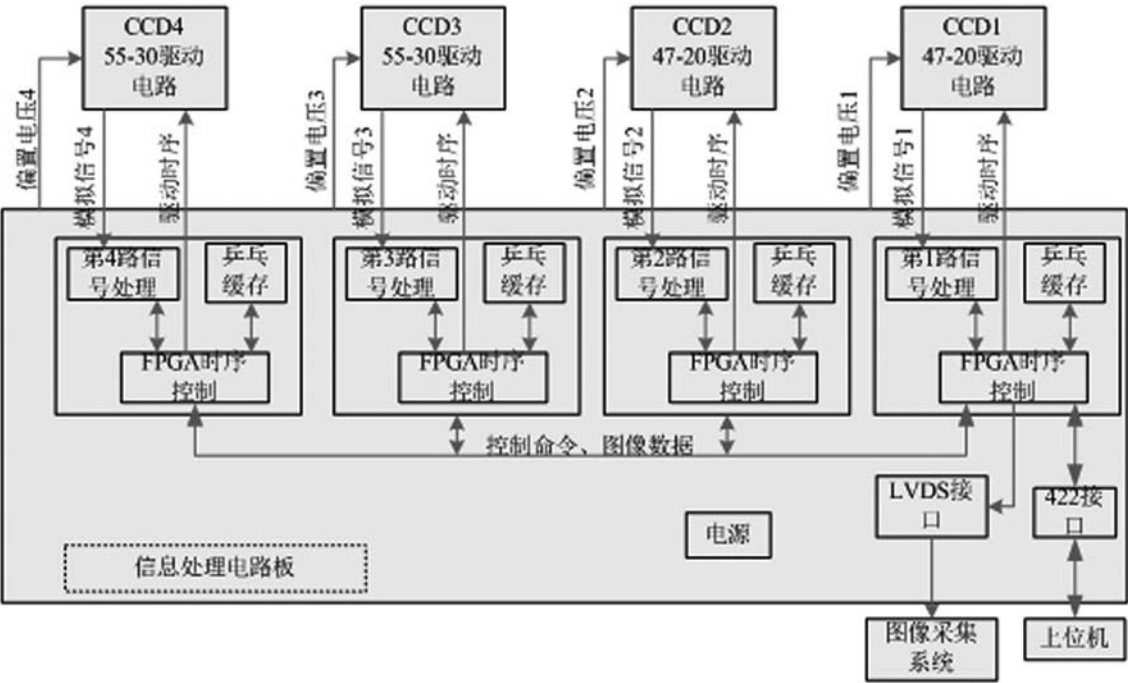


图 1 组成框图

图 2 所示为驱动芯片到 CCD 输入引脚的模型。其中, R_o 和 C_o 分别为驱动芯片的输出电阻和电容; R_1 为驱动端到 CCD 引脚的等效电阻; C_1 为 CCD 引脚的等效电容; u_1 为 CCD 所

该电路包含 4 块 CCD 驱动板和 1 块信息处理电路板。其中, 信息处理板负责信号处理、与上位机的通信以及数据传输, 它包含电源模块、4 路信号处理模块、乒乓缓存、RS422 接口和 LVDS 数据传输接口。图 1 为电路框图。

1.2 电源

CCD 器件及电路其他部分需要使用多种电平电压才能正常工作。这些电压分别通过 LM117 和 LT1764 芯片产生。因其电路均比较成熟, 本文在此不再赘述。

1.3 驱动电路设计

为了达到可重复编程和在线灵活调试的目的, 本文用 Cyclone III 系列 EP3C40F484 FPGA 产生相关的驱动时序。

CCD 的正常工作需要驱动电路为其提供足够的驱动电流及电压, 并满足其时序要求。下面对此进行具体分析。

需的驱动电压。

$$i_1 = \frac{C_1 du_1}{dt} \tag{1}$$

$$u_o = R_1 i_1 + u_1 \tag{2}$$

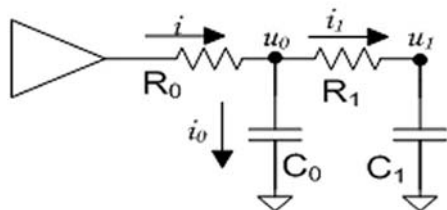


图 2 驱动电路模型

$$i = i_0 + i_1 = \frac{C_0 du_0}{dt} + \frac{C_1 du_1}{dt} \quad (3)$$

将式 (1) 和式 (2) 代入式 (3)，可以得到：

$$i = C_0 C_1 R_1 \frac{d^2 u_1}{dt^2} + (C_0 + C_1) \frac{du_1}{dt} \quad (4)$$

因为 C_0 和 C_1 一般是 pf 和 nf 级别， R 一般小于 1Ω ，所以式 (4) 中的第一项远小于第二

项，可以忽略不计，即

$$i = (C_0 + C_1) \frac{du_1}{dt} \quad (5)$$

由式 (5) 可知，当驱动信号上升时，所需的驱动电流最大。设计中使用的 CCD 驱动电平为 12 V ， $C_0 = 0 \text{ f}$ 。根据式 (5) 以及驱动信号的上升时间要求 t_{r-CCD} ，可以得到 CCD 所需的电流 (见表 2)。

MAX4426 输出的最大电流为 1.5 A ，满足表 2 中的 CCD 需求。表 3 列出了不同负载下 MAX4426 的上升时间 (t_r)，它们均满足 CCD 需求。

表 2 CCD 驱动需求

参数	驱动时钟				
	47-20 垂直转移时钟	47-20 水平转移时钟	47-20 复位时钟	55-30 垂直转移时钟	55-30 水平转移时钟
电极负载	11.5 nf	140 pf	10 pf	8.6 nf	355 pf
t_{r-CCD}	0.5 μs	40 ns	20 ns	0.4 μs	25 ns
驱动电流	276 mA	42 mA	6 mA	258 mA	170 mA

表 3 MAX4426 的上升时间与负载的关系

负载	11.5 nf	140 pf	10 pf	8.6 nf	355 pf
t_r	0.2 μs	20 ns	20 ns	0.1 μs	20 ns

1.4 信号处理

CCD 的噪声主要包括散粒噪声、读出噪声 (KTC 噪声、白噪声和 $1/f$ 噪声) 以及暗电流噪声。其中，散粒噪声是光注入光敏区在单位时间内产生电子数目的随机涨落，又称白噪声。KTC 噪声是 CCD 读出电路开关闭合前后产生的噪声，它在短时间内具有相关性。根据相关性，可以采用相关双采样的方法，即在短时间内采取参考电平和输出信号电平，将两者相减后得到去除 KTC 噪声的实际信号值。

为了有效抑制 KTC 噪声，本文直接采用 CDS1402 芯片。CDS1402 是一种专用的低噪声 CCD 相关双采样器件，与 14 位 AD (设计中使

用 THS1408) 配合使用时，其处理速率最小为 5 Mpixel/s 。

在长积分时间下，CCD 存在的暗电流噪声将不可忽略。暗电流取决于 CCD 的制作工艺，并且与温度成指数相关。温度每上升 $7 \text{ }^\circ\text{C}$ ，暗电流就会翻倍。当温度在 $-30 \sim -50 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内时，暗电流噪声很小，可以忽略不计^[1]。目前可以有效降低暗电流的方法主要包括：(1) 对探测器进行制冷，但制冷机的存在会在体积和重量上给整个系统提出更高的要求；(2) 采用探测器 pinning (或称 inverting) 技术^[2]，这种方法要求 CCD 是 MPP 结构或 AGP 结构，而我们使用的 CCD 不支持 pinning 技术。

考虑到工程应用中的实际情况，我们将每一行视频信号与行首采集的暗信号相减，以抑制因暗电流漂移而产生的信号波动。

在信号处理电路中进行合理的滤波器带宽设置也是一种抑制噪声的有效手段。设计中，

CCD 的最高读出速率为 2.5 Mpixel/s, 而有效 CCD 信号频域处在低频范围内。若滤波器的截止频率过高, 则将无法抑制高频噪声。因此, 我们采用二阶低通滤波器, 其截止频率为 4.6 MHz。

2 电路噪声分析与评价

在计算 CCD 器件噪声时, 一般认为散粒噪声是光生电子数的平方根, 暗电流噪声是暗信号电子数的平方根。假设 CCD 的光生电子数为 N_p , 暗信号电子数为 N_{dark} , 读出噪声电子数为 N_r , 则 CCD 器件的总噪声电子数 N_t 为

$$N_t = \sqrt{N_p + N_{dark} + N_r^2} \quad (6)$$

在无光条件下, $N_p = 0$ 。根据式 (6) 并结合 CCD 参数, 可以算出 N_t (见表 4)。

表 4 CCD47-20 的噪声电子数

积分时间	N_s (e^-)	N_e (e^-)	N_{CCD} (e^-)	N_t (e^-)	η (%)
0.5 s	79.7	66.3	44.2	71.0	37.7
1 s	90.1	66.1	61.2	100.2	39.0
2 s	108.5	66.1	86.0	141.5	39.2
4 s	130.1	66.4	111.9	200.1	44.1

成像系统的噪声 N_s 包括 CCD 噪声 N_{CCD} 与电路噪声 N_e :

$$N_s = \sqrt{N_{CCD}^2 + N_e^2} \quad (7)$$

系统噪声 N_s 的测试方法如下: 探测器在无光入射条件下工作时, 通过数据采集界面采集 100 帧以上的图像信号, 计算 100 帧图像每个像元的均方差, 取均方差均值为 N_s (文中噪声均是通过先统计 100 帧图像数据各像元的均方差, 然后再对均方差求均值的方法得到的)。电路噪声 N_e 的测试方法如下: 探测器驱动板不工作, 信息处理板的视频信号输入端接地, 然后统计 100 帧图像均方差的均值 N_e 。测试 N_s 与 N_e 后, 根据式 (7) 就可以算得降噪后的 CCD 噪声 N_{CCD} 。

文中引入的噪声抑制系数 η 用于评价电路在整个成像系统对 CCD 噪声的抑制效果:

$$\eta = (1 - N_{CCD}/N_t) \times 100 \% \quad (8)$$

以 CCD47-20 为例, 在无光入射和不同积分时间下的噪声情况见表 4。可以看出, 在不同积分时间下, 该电路均获得了良好的噪声抑制效果。

3 PCB 布线

我们在实验中发现, 4 路信号处理电路之间存在干扰问题。当第 1 路探测器单独成像, 即只有第 1 路信号处理电路中的 FPGA 工作时, 图像清晰; 当其他路信号处理电路中的 FPGA 一起工作时, 图像就会出现干扰条纹。在改进 PCB 布线后, 干扰大大降低。下面对两块采用不同布线方式的电路板的噪声进行测试。

测试条件如下: THS1408 输入端断开, 工作在 test 模式 (offset=0); 设置 TM2-0=001, 即 THS1408 的 +、- 输入端均为 ref-。采集 100 帧以上的数据, 统计噪声。图 3 所示为噪声对比情况。

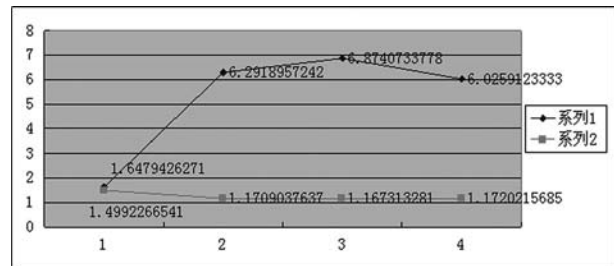


图 3 不同 PCB 布线时的干扰情况对比

图 3 中的系列 1 电路板 PCB 布线方法如下: 模拟地分割采取星型接地, 4 路信号处理电路的模拟地只在电源输入端相接。AD 芯片数字与模拟电源单独供电, 数字地与模拟地在芯片下分割开, 并通过 0Ω 电阻连接。

对于图 3 中的系列 2 电路板, 在布线时充分考虑到信号回路, 其模拟地采取菊花链拓扑, 整片铺地; 每一路探测器信号处理部分单独供电, AD 芯片被当成模拟芯片^[3], 数字电源是由模拟电源经磁珠滤波提供的, 其数字地也接到系统的模拟地。因为 THS1408 本身有 buffer, 所以 AD 输出直接与数字域连接。为了给 AD 工作时序如 clk 信号提供回路, 我们在引脚附近将一个电容跨接在数字地与模拟地之间。

图 3 中, 横轴表示同时工作的路数, 纵轴表示第 1 路输出图像受其他路干扰的情况。

对于系列 1 电路板, 在只有第 1 路工作的时候, 其噪声值为 1.65 LSB; 第 1、2 路同时工作时, 其噪声值为 6.29 LSB; 第 1、2、3 路同时工作时, 其噪声值为 6.87 LSB; 4 路同时工作时, 其噪声值为 6.03 LSB。由此可见, 不同通道之间干扰严重。对于系列 2 中改进布局布线后的电路板, 其通道间的干扰大大减小。可见 PCB 设计对系统性能具有重要影响。在 AD 芯片数字地和模拟地的分割方面, 是否将数字地与电路模拟地连接上存在争议。实验数据表明, 本文设计把 AD 当作模拟芯片是一种合适的选择。在设计时应该注意以下几点: (1) 合理布局是优秀布线的基础; (2) 充分考虑信号回路, 合理分割电源、地平面, 尽量减小环路面积, 减少电磁干扰; (3) 对弱信号 (如 CCD 输出的模拟信号) 进行保护, 可在信号两旁平行地走地线; (4) CCD 驱动信号走线尽量短, 尽可能靠近 CCD 管脚。

4 外景成像

在 0.5 s 积分时间下, CCD47-20 和 CCD55-30 探测器对外景进行了成像。成像系统的光路

部分采用商用尼康镜头。图 4 为在冬季晴天的傍晚时分拍摄的 47-20 图像, 其中的饱和区域是由房间内的灯光引起的。图 5 为冬季阴天时在尼康镜头前加 100:1 衰减片 (由于 CCD55-30 在 0.5 s 积分时间下的灵敏度很高, 若不加衰减片, 图像会出现饱和) 后所拍摄的 55-30 图像。



图 4 CCD47-20 成像



图 5 CCD55-30 成像

5 结束语

本文通过建立探测器的驱动模型, 计算了

探测器驱动时序上升沿所需的峰值电流。根据峰值电流与上升时间要求, 选择 MAX4426 作为驱动芯片, 并采用相关双采样与滤波器相结合

的方法对探测器噪声进行抑制。电路噪声分析结果表明, 探测器的噪声得到了有效抑制。在PCB设计中, 由于将AD芯片当作模拟芯片使用, 并将AD的数字地连接到电路的模拟地, 合理设计了信号的回流路径, 使得4路信号处理电路间的串扰大大减小。4路探测器成像电路与商用尼康镜头搭配使用后已成功获取了低噪声微光外景成像, 说明本文设计具有可行性, 能够为同类设计提供参考。

(上接第17页)

反射后向卫星途中的大气透过率 ($2.7\ \mu\text{m}$) $\tau_2 = 0.4986$ 。

另外, 红外相机入瞳处的灵敏度 $P'_e = 1.62 \times 10^{-12}\ \text{W}$, 入瞳直径 $D_e = 0.5\ \text{m}$, 则入瞳面积 $A'_e = 0.7854\ \text{m}^2$ 。假定反射镜面的反射率 $\rho(T) = 0.5$, 镜面发散角 $\theta_M = 1^\circ$, 则可根据式(9)求出反射镜面的面积为 $0.6660\ \text{m}^2$ 。

反射镜面的面积与反射镜面的反射率以及镜面发散角密切相关。当前的工艺水平完全能够满足需求。通过增加镜面反射率和减小镜面发散角便可缩减镜面面积, 进而减小浮空平台载荷。

基于浮空平台的在轨定标方法对浮空平台载荷的要求较低, 可以进行大量在轨定标, 进而可以提高卫星的在轨定标精度。

4 结束语

本文提出了一种新的基于浮空平台的在轨定标方法, 建立了相关模型, 并对这种模型进行了分析。从分析中可以看出, 该方法克服了一般

参考文献

- [1] 李云飞, 司国良, 郭永飞. 科学级 CCD 相机的噪声分析及处理技术 [J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(Z): 158–163.
- [2] Westhoff R C, Burke B E, Clark H R, et al. Low-Dark-Current, Back-Illuminated Charge-Couple-Device [C]. *SPIE*, 2009, **7249**: 72490J.
- [3] Analog Devices Inc. Linear Circuit Design Handbook [M]. Oxford: Analog Devices, 2008.

在轨定标方法难以对红外大气吸收波段进行定标的缺点, 减小了大气状况对在轨定标的影响。这种新方法能够进行大量在轨定标, 从而获得精度更高的遥感数据, 对定量遥感的发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 星载光学遥感器可见光近红外通道辐射定标研究进展 [J]. *遥感信息*, 2010, **25**(4): 117–128.
- [2] 童进军, 邱康睦, 李小文, 等. 利用 EOS/MODIS 交叉定标 FY1D/VIRR 可见光 – 近红外通道 [J]. *遥感学报*, 2005, **9**(4): 349–356.
- [3] 龙亮, 王世涛, 周峰, 等. 空间红外点目标遥感探测系统在轨辐射定标 [J]. *航天返回与遥感*, 2012, **33**(2): 73–80.
- [4] Slater P N, Bigger S F, Thome K J, et al. Vicarious Radiometric Calibrations of EOS Sensors [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, **13**(2): 349–359.
- [5] 赵艳华. 中波红外面阵遥感相机相对辐射定标方法研究 [J]. *航天返回与遥感*, 2010, **31**(3): 48–49.
- [6] 王鑫. 浮空器再度演绎经典传奇 [J]. *现代军事*, 2003, **15**(2): 26–28.
- [7] 刘鹏, 盛怀洁, 廖明飞. 浮空器优势分析及其军事应用 [J]. *飞航导航*, 2011, **20**(9): 84–87.