

空间相机 CCD 信号处理电路匹配性分析

李丙玉

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 在应用 CCD 探测器的空间相机系统中, CCD 信号处理电路与 CCD 探测器的匹配性至关重要, 决定了整个相机系统的性能指标, 因此在 CCD 信号处理电路设计完成后, 需要对设计的匹配性进行分析。首先, 介绍了空间相机系统 CCD 信号处理电路的典型结构; 然后, 提出了基于动态范围的匹配性分析方法; 最后, 应用该分析方法对某空间相机系统的 CCD 信号处理电路设计进行了匹配性分析, 发现了电路设计中存在的不匹配环节, 为优化电路设计提供了依据和建议。

关键词: CCD; 空间相机; 信号处理电路; 动态范围

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.99

Matching analysis of CCD signal processing circuit in space camera

Li Bingyu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In the system of space camera using CCD as the sensor, the matching design of signal processing circuit with the CCD sensor is crucial, and the performance of whole space camera is determined, so the matching analysis should be done after the design of CCD signal processing circuit is finished. Firstly, the typical structure of CCD signal processing circuit in space camera is introduced; then, the analyzing method of matching is proposed based on dynamic range; finally, this method is used in one space camera project and found some not suitable design in the circuit, the basis and suggestion of optimization in circuit design is provided.

Keywords: CCD; space camera; signal processing circuit; dynamic range

1 引言

电荷耦合器件 CCD(charge coupled device)是 20 世纪 70 年代初发展起来的新型半导体集成光电器件。依靠已经成熟的 MOS 集成电路工艺, CCD 器件及其应用技术得以迅速发展, 目前已经广泛应用于在航天、航空等领域相机系统的设计中^[1-3]。

通常情况下, 在空间相机系统设计中, CCD 探测器的芯片选型根据应用需求(像元大小、像元数目、谱段、动态范围等因素)最先确定, 然后开展 CCD 信号处理电路的设计工作。CCD 信号处理电路设计完成后, 如何评价 CCD 信号处理电路设计的合理性, 是否与 CCD 探测器的选型相匹配, 目前没有统一的评价准则, 往往通过实验手段进行验证, 一旦发现问题则要重新设计并制版, 影响项目进度。

本文针对该问题提出了一个对 CCD 信号处理电路与 CCD 探测器进行匹配性分析的方法, 在 CCD 信号处理电

路制版之前对设计的合理性进行分析, 定位不合理的设计环节并给出修改建议, 确保 CCD 探测器的最优性能充分发挥, 在工程项目开发中具有现实意义。

2 典型的 CCD 信号处理电路

景物信息经光学系统后成像在 CCD 探测器上, CCD 探测器将光信号进行光电变换为模拟信号后进入 CCD 信号处理电路, 空间相机中典型的 CCD 信号处理电路机构如图 1 所示。主要包括前置预处理单元、CDS(correlated double sampling)相关双采样单元、可编程增益放大单元、暗电平校正单元和 AD 量化单元^[4]。

其中前置预处理单元由低噪声运算放大器构成, 主要作用是对 CCD 信号进行隔离驱动, 兼具信号幅值调整的作用(在多成像通道的空间相机设计中, 可实现通道间的非均匀性校正功能)。

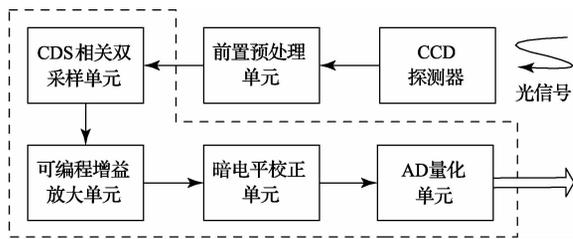


图 1 典型空间相机 CCD 信号处理电路结构

CDS 相关双采样单元是 CCD 信号处理电路的重要组成部分。通过控制时序采样信号 SH1 和 SH2 的上升沿位置,分别对 CCD 信号的信号电平和参考电平进行采样,将两次采样值相减输出,抑制了 CCD 信号中的复位噪声和其他共模噪声^[5],通过相关双采样技术基本上可以将噪声降低一个数量级^[6]。图 2 给出了相关双采样技术的原理示意图。

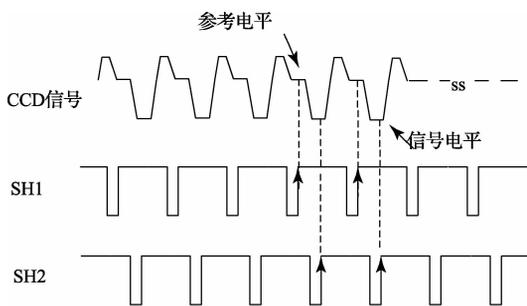


图 2 CCD 信号相关双采样示意图

可编程增益放大单元是通过数字化的控制方式,在 CCD 信号量化之前实现 CCD 信号的增益调整。其目的是使相机系统适应不同的应用场景,增强图像的可视性,便于捕获有效目标。

暗电平校正单元用于消除 CCD 信号存在暗电平噪声电压。暗电平噪声是指在无光信号输入的条件下,信号电平与参考电平存在的差值。如果不对暗电平进行消除,则会损失一部分 AD 量化芯片的动态范围^[7]。

考虑到集成化和轻量化的要求,空间相机中通常采用集成化的 CCD 视频信号处理器来完成相关双采样,可编程增益放大,暗电平校正和 AD 量化功能(图 1 中虚线包围的部分),本文论述基于该集成化设计方案。

3 匹配性分析原则

CCD 动态范围(DR)是 CCD 探测器的关键指标,其值表征出 CCD 对图像层次的细分能力。CCD 信号处理电路设计匹配性准则就是要保证 CCD 探测器的动态范围损失程度最小。

通常情况下,CCD 动态范围的定义为饱和电压值 V_{SAT} 与读出噪声 N_R 的比值,其计算公式为:

$$DR = \frac{V_{SAT}}{N_R} \quad (1)$$

注:某些探测器厂家将动态范围定义为满井电荷数与读出噪声电荷数的比值。或者满井电荷数与暗电流电子数的比值。本文论述采用(1)中的定义。

3.1 量化位数分析

CCD 的动态范围表征出能够体现图像层次的能力,为了不损失 CCD 探测器的动态范围,要求 CCD 信号处理电路中 AD 量化位数要与之匹配,经分析,AD 量化位数的选择应满足式(2)要求:

$$2^{N-1} < DR < 2^N \quad (2)$$

式中: N 为推荐的 AD 量化单元的量化位数,此时最低位量化值包含噪声信号,有效量化位数为 $N-1$ 位。

如果 AD 电路的量化位数小于 N ,则图像损失了图像细节信息,动态范围降低;相反如果 AD 电路的量化位数大于 N ,则低位量化值为随机噪声,无实际意义。因此 AD 电路的量化位数不得小于 N ;在条件允许的情况下,建议选择量化位数大于 N 的 AD 转换电路,并取高 $N-1$ 位量化值输出的设计方式。

3.2 信号调幅分析

CCD 饱和电压值 V_{SAT} 是指 CCD 探测器能够输出的最大信号幅值,CCD 信号处理电路设计中 AD 量化电路的电压输入范围 V_{IN} 要能覆盖 V_{SAT} ,否则会损失部分 CCD 探测器的动态范围。

如节 2 所述,CCD 信号预处理单元具备 CCD 信号的幅值调整功能,因此要求经 CCD 信号预处理单元调整后要求满足式(3)的要求:

$$V_{SAT} \times A_{GAIN} = V_{IN} \quad (3)$$

式中: A_{GAIN} 指前置预放单元的放大倍率。

需要说明的是,由于 CCD 信号处理电路中可编程增益控制单元也可以实现 CCD 信号的幅值调整功能,式(3)中 $V_{SAT} \times A_{GAIN}$ 小于 V_{IN} 时不会损失 CCD 探测器的动态范围,但相对于 CCD 信号预处理单元,可编程增益控制单元在放大有效信号的同时会将前置预放电路和相关双采样电路中引入的噪声信号进行了放大,不利于信噪比的提高,因此建议信号幅值调整仅由前端预处理单元完成。

3.3 噪声水平分析

在 AD 量化位数和预处理单元增益设计合理的情况下,如果噪声控制不当也会损失探测的动态范围。在 CCD 信号处理电路设计中,除特殊设计的滤波电路外,每增加一级处理电路,就会增加一个噪声源。在不考虑 PCB 设计不当引入信号噪声的情况下,AD 量化前 CCD 信号上的包含的噪声信号总和可通过式(4)进行计算:

$$N_a = \sqrt{N_R^2 + N_1^2 + N_2^2 + \dots + N_m^2} \quad (4)$$

式中: N_a 为总的电路噪声, N_a 为 CCD 读出噪声, N_1 至 N_m 为 m 级信号处理芯片的等效输入噪声。通过 CCD 信号处理电路,噪声水平必将增大,但应控制 CCD 信号处理电路

的噪声水平满足式(5)要求,这样仍能保证 $N-1$ 位的有效量化位数。

$$Na \leq \frac{V_{SAT} \times A_{GAIN}}{2^{N-1}} \quad (5)$$

式中: N 为式(2)中推荐的 AD 量化位数。

4 匹配性分析

某空间相机中探测器选用了 Dalsa 公司定制型 TDI-CCD 芯片,其设计指标见表 1。

表 1 TDI-CCD 设计指标

序号	名称	指标
1	饱和电压(V_{SAT}/mV)	≥ 1560
2	读出噪声(N_R)	≤ 0.828

前置预处理单元选用 National Semiconductor 的 LMH6722 高带宽视频信号运算放大器,该款运算放大器是电流型负反馈放大器,小信号带宽达到 400 MHz,噪声水平为 $3.4nV \sqrt{Hz}$,在正向增益为 2 倍时,推荐的反馈电阻为 300 Ω 。电路结构如图 3 所示。

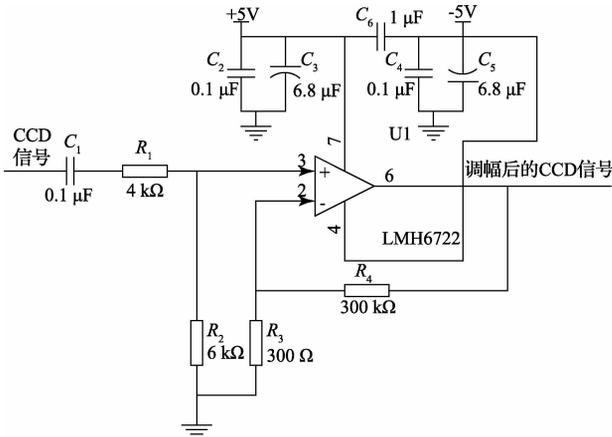


图 3 预处理单元原理图

其中电阻 R_1 和 R_2 实现对 CCD 信号的幅值缩小倍数调整,电阻 R_3 和 R_4 实现对 CCD 信号的固定增益 2 倍放大。

$$A_{GAIN} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times \frac{R_3 + R_4}{R_3} \quad (6)$$

将电阻值代入上式,计算得到 A_{GAIN} ,经过预处理单元 CCD 信号完成了 1.2 倍的放大处理。

CCD 信号的相关双采样,可编程增益放大,暗电平校正和 AD 量化选用了 EXAR 公司型号为 XRD98L59 的集成视频处理器。其内部结构如图 4 所示。

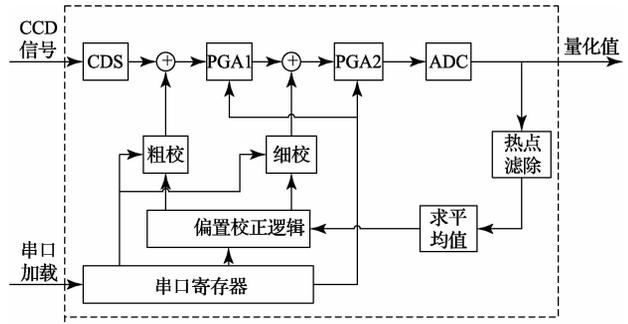


图 4 XRD98L59 内部结构

通过时序控制可实现 CDS 的采样位置调整和暗电平自动校正;通过配置内部寄存器可实现 2 到 80 倍的增益放大。主要指标见表 2。其中信号输入范围和等效输入噪声与增益设置有关,表中给出了最小增益情况下的指标。

表 2 XRD98L59 的关键指标

序号	名称	指标
1	信号输入范围(V_{IN})	1000mV@min Gain
2	等效输入噪声	0.7mV @min Gain
3	AD 量化位数	10 bit

应用节 3 中给出的匹配性分析原则对该空间相机 CCD 信号处理电路进行匹配性分析。

量化位数分析:

将表 2 中 CCD 探测器饱和电压 V_{SAT} 和读出噪声 N_R 的值代入式(1)中,得到 CCD 动态范围的值:

$$DR = \frac{156 \text{ mV}}{0.928 \text{ mV}} = 1884$$

将 CCD 探测器的动态范围 DR 值代入式(2)可得:

$$2^{11-1} < 1884 < 2^{11}$$

N 等于 11,即要求 CCD 信号处理电路的 AD 量化位数大于等于 11,有效量化位数为 10。原设计中 AD 量化位数 10,损失了图像细节信息,建议改选量化位数更高的视频处理芯片。

信号调幅分析:

幅值匹配应满足式(4)的要求,实际上经预放单元处理后:

$$V_{SAT} \times A_{GAIN} = 1560 \text{ mV} \times 1.2 = 1872 \text{ mV}$$

该值大于视频处理器 XRD98L59 的信号输入范围 1000 mV, CCD 探测器输出高于 1000 mV 的动态范围不能被有效量化。应调整 R_1 和 R_2 的值降低 A_{GAIN} 的值到 0.64。

噪声水平分析:

将 $N_R = 0.828 \text{ mV}$, $A_{\text{GAIN}} = 0.64$, $N_1 = 0.7 \text{ mV}$ 代入式(5)(预放单元的芯片噪声为 nV 量级,计算中忽略),计算得到 N_a 的值:

$$N_a = \sqrt{(0.64 \times 0.828)^2 + 0.7^2} \text{ mV} = 0.878 \text{ mV}$$

将 AD 量化位数 $N = 11$, CCD 饱和电压值 $V_{\text{SAT}} = 1560 \text{ mV}$, 预处理单元 $A_{\text{GAIN}} = 0.64$, 代入式(6), 得到 AD 量化前允许的最大噪声水平为:

$$\frac{1560 \text{ mV} \times 0.64}{2^{11-1}} = 0.975 \text{ mV}$$

该值大于 N_a , 满足式(6)的要求。可实现有效量化位数 10 bit 噪声水平要求。

综上所述可知, 该空间相机中 CCD 信号处理电路设计与探测器选型存在不匹配环节, 为避免损失图像层次细节, 建议更换量化位数高于 11 bit 的视频处理器芯片; 为避免损失探测器高亮度部分的动态范围, 建议调整预放单元的放大倍数为 0.64。调整后可实现有效量化位数为 10 bit 技术指标。目前设计情况下, 有效量化位数为 9 bit。

5 结 论

针对空间相机 CCD 信号处理电路设计的合理性提出了一种基于动态范围匹配的评价分析方法, 通过量化位数、信号调幅和噪声水平的分析, 量化的对 CCD 信号处理电路的设计的优劣进行评价。应用该方法对某空间相机 CCD 信号处理电路的设计进行了分析, 发现了两处不合理的设计, 并给出了优化设计的具体建议。

参考文献

[1] 荣少巍. 基于 FPGA 的高精度多通道采集存储系统研究[J]. 电子测量技术, 2014 (4): 108-111.

- [2] 石俊霞, 李佩玥, 郭永飞, 等. 航天遥感 TDI CCD 相机面阵成像模式的实现[J]. 国外电子测量技术, 2014 (5): 97-101.
- [3] 郭汉洲, 吕恒毅, 曲利新. 遥感相机动态调制传递函数与时间延迟积分 CCD 行周期误差的关系[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2195-2200.
- [4] 付天骄, 张立国, 王文华, 等. 空间相机图像复原的实时处理[J]. 光学精密工程, 2014, 23 (4): 1122-1130.
- [5] 韩昌元. 光电成像系统的性能优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 1-9.
- [6] 周虎, 王小勇. 航天 TDICCD 相机图像空间移变振动降质的复原[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(2): 23-28.
- [7] 任航, 张涛. 使用可交换带通滤波器的双相关采样法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10).
- [8] 郝贤鹏, 任建岳. TDICCD 相机的低噪声视频处理技术[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1869-1873.
- [9] 李丙玉, 王晓东. CCD 视频信号集成处理器的暗电平自动校正[J]. 液晶与显示, 2010 (6): 879-883.
- [10] 郭伟强, 万志, 常磊, 等. 面阵 CCD 信号采集系统的噪声抑制[J]. 发光学报, 2008, 29(1): 204-208.

作者简介

李丙玉, 1980 年出生, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为空间遥感成像技术, FPGA 信息处理技术, 红外技术等。

E-mail: ciomp_liby @139.com