

文章编号 1004-924X(2007)08-1191-05

CCD 成像系统中模拟前端设计

薛旭成^{1,2}, 李云飞^{1,2}, 郭永飞¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: CCD 成像系统中模拟前端对系统信噪比起决定性作用。为了提高成像系统的信噪比, 需要对模拟前端以及其 PCB 布局布线进行合理的设计。在深入分析模拟前端中各部分功能的基础上, 针对目前模拟前端一般采用专用 CCD 视频信号处理器来实现的方案, 建立了 CCD 视频信号处理器这个模拟数字混合器件芯片内部的电源及接地模型, 并根据该模型对 PCB 布局布线进行了分析和设计。工程实践结果表明, 在像素时钟为 6 MHz 时, 系统的信噪比可以达到 54 dB。

关键词: CCD; 成像系统; 模拟前端; 高速相机; 低噪声

中图分类号: TN386.5 **文献标识码:** A

Design of analog front end of CCD imaging system

XUE Xu-cheng^{1,2}, LI Yun-fei^{1,2}, GUO Yong-fei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The analog front end of a CCD imaging system is critical to the signal noise ratio of the camera. In order to increase the signal noise ratio of the imaging system, the layout and the PCB routing of the analog front end must be properly designed. Thus, based on analysis of the function of every part of the analog front end and design scheme of a specified CCD video signal processor, the power supply and grounding model of the specified CCD video signal processor with the analog and digital mixed signal device was established. And according to this model, the layout and PCB routing for the analog front end were analyzed and designed. The result shows that the signal noise ratio of the system could be up to 54 dB when the pixel clock is 6 MHz.

Key words: CCD; imaging system; analog front end; high-speed camera; low noisy

1 引言

由于 CCD 具有信号输出噪声低、动态范围大、量子效率高以及电荷转移效率高等优点, 在光

电探测及成像领域获得了广泛应用^[1]。除了在可见光范围应用外, CCD 也延伸到紫外甚至 X 射线^[2-3]。而具有延时积分功能的 TDI-CCD 也在光学遥感领域获得了广泛应用^[4]。随着 CCD 设计和制造工艺的不断发展以及应用的需要, 其像元

收稿日期: 2007-05-22; 修订日期: 2007-07-18.

基金项目: 国家重大创新资助项目 (No. ZB99114H)

尺寸逐渐缩小,而电荷转移频率又不断升高,这样其信号输出幅度也相应减小。尤其在高速 CCD 成像系统中为了获得高质量的图像,模拟前端的设计是非常关键的,因为在高速情况下模拟前端是比较容易引入干扰和噪声的。

模拟前端的作用是把 CCD 输出的模拟信号经过放大降噪等处理后,在采样及控制脉冲的作用下变换成相应的数字图像信号。按照信号流,模拟前端处在信号流的开始阶段,其输出已经变换成数字信号,而后续数字电路几乎不会被干扰,因此模拟前端对系统信噪比起决定性作用。另外,模拟前端带宽的合理选择可以对系统噪声和系统调制传递函数这两项指标进行折中以满足应用需求。目前 CCD 视频信号处理器输入需要的 CCD 信号电压摆幅一般在 1 V 左右。根据不同的应用,A/D 的量化位数往往需要 10 bit、12 bit 甚至 14 bit。为了满足这些要求,并使系统达到速度、性能、体积及功耗的最优,需要对模拟前端进行深入地分析和合理设计。

2 模拟前端设计

图 1 是典型的 CCD 成像系统框图。CCD 在驱动脉冲的作用下,输出相应的 CCD 视频信号。这个模拟视频信号进入模拟前端处理后输出数字图像。CCD 的时序产生部分用于产生 CCD 及模拟前端所需的时序。

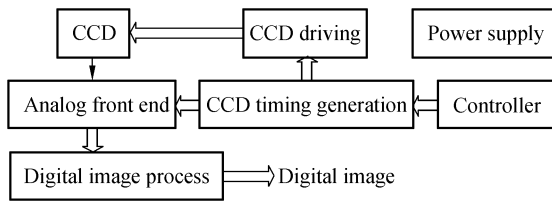


图 1 CCD 相机框图

Fig. 1 Block diagram of CCD camera

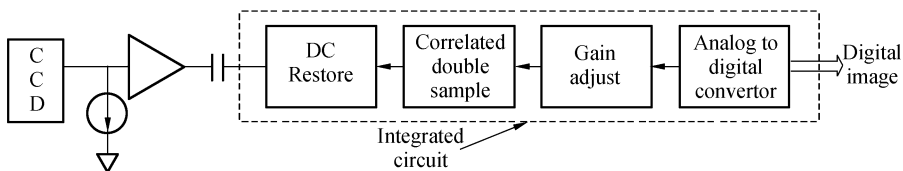


图 3 模拟前端框图

Fig. 3 Block diagram of analog front end

CCD 视频信号波形图如图 2 所示。实际上,可以认为 CCD 输出的视频信号是底部被幅度调制的方波。模拟前端的任务就是从这个信号中提取出有用的视频信号而去掉其他不需要的干扰及噪声信号。为了有效地提取有用的视频信号而去除各种干扰和噪声信号,目前广泛采用的是相关双采样技术及暗电平校正技术。也就是说,首先复位平台电平减去视频信号电平得到视频信号采用的是相关双采样;接着把得到的视频信号再减去暗电平信号得到最终有用的视频信号,采用的是暗电平校正技术。

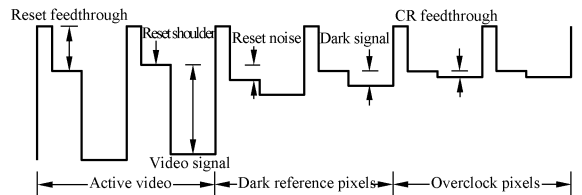


图 2 CCD 视频信号波形图

Fig. 2 Waveform of output signal of CCD

图 3 是根据信号流传递方向模拟前端框图。首先,一些 CCD 信号输出的最后一级放大器负载没有集成在 CCD 内部而需要加在片外电路中上。其次,CCD 电压信号进入前置跟随放大器。最后,一般通过隔直电容采用交流耦合的方式传送 CCD 视频信号。为了使后续电路能够单电源工作,需要进行直流恢复工作。对直流恢复后的信号进行相关双采样以去除复位噪声及低频噪声。对提取出的视频信号进行增益调整后,即可进行模数转换,最终输出数字图像。目前很多公司都把直流恢复、相关双采样、增益调整及模数转换这些单元集成到一个芯片里,构成一个专用 CCD 视频信号处理器。例如,EXAR 公司的 XRD9856、PHILIPS 公司的 TDA8783、AD 公司的 AD9826 等都是性能优秀的专用集成芯片,这些芯片内部还集成了暗电平校正电路。

2.1 外部放大器负载

目前,很多 CCD 输出信号的最后一级放大器负载没有集成在 CCD 内部而需要加在片外电路中,如图 4 所示。这样设计的好处是 CCD 芯片内部产生的热量较少,使 CCD 性能更佳。

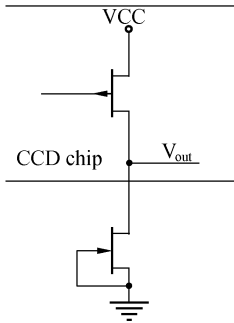


图 4 CCD 输出放大器结构

Fig. 4 Architecture of CCD output amplifier

片外实现负载的方法基本有两种,即电阻负载和恒流源负载,两者各有优缺点。电阻负载的优点是实现极其简单,成本便宜;其缺点是使这一级放大器的输入电阻提高受到限制,增加电阻值会提高放大器的输入电阻,但是却使放大器直流工作点偏移而离开放大区进入饱和区。恒流源负载具有交流电阻大而直流电阻可控的优点,因而可以克服电阻负载的缺点,实现恒流源负载使用较广泛的实现方式是基于三极管的恒流电路,如图 5 所示,其优点是设计相对简单,缺点是三极管的发射极压降会随温度变化而变化。当温度上升后,恒流源电流下降。为了克服这个缺点,可以设计镜像恒流源电路^[5]。

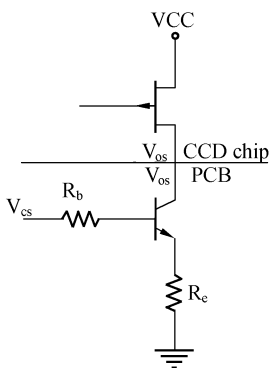


图 5 基于三极管的恒流负载电路

Fig. 5 Constant current load based on transistor

2.2 前置跟随放大器

CCD 的输出阻抗大约在 $150 \sim 300 \Omega$ 之间,

而 PCB 导线的特性阻抗一般设计成典型的 50Ω 或 75Ω ,所以如果传送信号的线长达到一定程度就会产生传输线效应,使信号完整性受到破坏。尤其在高速相机中,传输线效应会更加严重。为了达到阻抗匹配,需要设计前置跟随放大器进行特性阻抗匹配。这也是本文在高速相机设计中重点考虑的一个问题。

此外,设计的前置跟随放大器还具有隔离 CCD 与后续电路的能力。在相机调试阶段,用示波器等可以测量前置跟随放大器的输出信号而避免直接测量 CCD 的输出管脚。这样就可以避免测量时错误操作引起的短路,烧坏 CCD 芯片内部的输出放大器,从而保护了 CCD。

2.3 直流恢复

CCD 输出的视频信号通常具有较大的直流偏置。直接处理这样的信号非常不方便,因为它需要高的电源电压来防止电路饱和。为了更好地提取视频信号,可采用交流耦合方式来隔断直流成分。但去除了直流成分,CCD 输出信号的复位平台电平就丢失了,所以要重新建立一个复位平台参考电平,这就要采用直流恢复技术。直流恢复技术实际上就是对 CCD 输出的信号电平进行搬移。

2.4 相关双采样及增益调整

相关双采样技术在 CCD 视频信号处理领域中被广泛使用,它可以消除复位噪声和低频噪声。相关双采样的电路拓扑结构有很多种^[6],相关双采样是提高 CCD 成像系统信噪比的重要技术。

增益调整是为了在不同的光照下使 CCD 信号仍然能较好地处在模数转换的量程范围内,从而使图像不至于太暗或者饱和。增益调整部分放大器噪声应极低。

2.5 模数转换

模数转换单元最终把 CCD 经过处理的模拟信号变成数字图像信号。模数转换的时钟相位抖动会影响模数转换的性能,因此,要求模数转换时钟的相位抖动特别小。此外,模数转换部分既有模拟供电又有数字供电,所以电源的去耦隔离及接地的合理设计会对模数转换的性能起关键作用。这部分内容将在下面详细论述。

2.6 系统带宽的设计

放大器带宽的合理选择也会对系统的信噪比产生较大的影响。在保证信号满足要求的条件下

应尽量减小系统带宽。为此,可以按如下方法设计带宽。为了简化问题的分析,把 CCD 信号简化为方波而忽略复位脉冲干扰,并假设系统为 RC 一阶系统。在这样的情况下,设 A/D 转换可以容忍的误差为 $\frac{1}{2}$ LSB, 设采样时钟在信号达到最大幅值前 T_{sam} 时刻进行采样。则建立时间为:

$$T_{\text{set}} = \frac{1}{2f} - T_{\text{sam}}, \text{ 其中 } f \text{ 为像素时钟频率;}$$

该系统时间常数为:

$$\tau = \frac{T_{\text{set}}}{-\ln(1/2^{B+1})}, \text{ 其中 } B \text{ 为 A/D 量化位数;}$$

那么系统带宽为:

$$f_{\text{BW}} = \frac{1}{2\pi \times \tau}$$

3 模拟前端的 PCB 设计

在高速或高精度电路系统中,PCB 的设计对系统影响很大,其实 PCB 也是电路的重要组成部分。以往的设计往往忽略了 PCB 的电气特性而使设计的系统无法达到预期效果。此外,在 PCB 设计中的接地系统也应合理设计,尤其是在高速系统以及模拟数字混合系统中。CCD 成像系统的模拟前端恰是相对高速电路系统且包含模拟数字的混合器件,因此,不恰当的设计会使系统引入过量的干扰和噪声而使系统无法达到设计的指标。

如果混合信号器件具有比较低的数字电源电流,通常应该把这个混合信号器件当作模拟器件对待^[7]。CCD 视频信号处理器就是这样的器件,其接地和电源去耦都要针对模拟地平面进行。这样做好像有些矛盾,因为这些器件既有模拟部分又有数字部分,而且会有引脚模拟地 AGND 和数字地 DGND。图 6 所示的模拟数字混合电路芯片内部简化模型会解释这个问题。在芯片内部既有模拟部分又有数字部分,数字地和模拟地在芯片内部是分开的,可以避免数字信号干扰模拟信号。芯片设计人员对引脚的等效电感和等效电阻已经没有办法减小了,而迅速变化的数字电路部分电流会在 B 点产生电压,这个电压会通过图 6 中所示的分布电容 C_{stray} 耦合到模拟电路的 A 点。

过去有一个误区,芯片的模拟接地引脚 AGND 应接在系统模拟地平面上,芯片的数字接

地引脚 DGND 应接在系统的数字地平面上。实际上,芯片的 DGND 引脚只是表明它连接到了芯片内部的数字电路部分的接地引脚,但并不意味着它必须连接到系统的数字地平面上。根据上述分析,应该把模拟接地引脚 AGND 和数字接地引脚 DGND 都直接接到系统的模拟地平面上。这样设计的确会有少量的数字噪声注入模拟地平面,但只要确保变换器的输出不驱动大的容性负载,数字电流就会非常小。数字逻辑供电引脚 V_d 可以通过使用铁氧体磁珠进一步和模拟电源隔离。这样,芯片的数字电流将会在一个小环内流动。该电流环的电流在图 6 中用粗线表示。所以,瞬态的数字电流就被限制在这个小环中,而不会出现在模拟地平面的其他地方。 V_d 引脚的去耦电容应该尽可能靠近该引脚以减小分布电感。去耦电容也应该选用低等效电感的陶瓷电容,根据工作速度的不同通常在 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{F}$ 。在芯片数据输出和数据总线间接入一个缓冲器可以很好地隔离数据总线上的噪声。在 ADC 输出和缓冲器输入间的串联电阻可以减小转换器的瞬态电流。此外,由串联电阻和缓冲器输入电容构成的 RC 网络成为一个低通滤波器,这样可以减少数据沿的上升和下降时间。缓冲器应该接数字地平面,其去耦合电容也应针对数字地平面去耦。

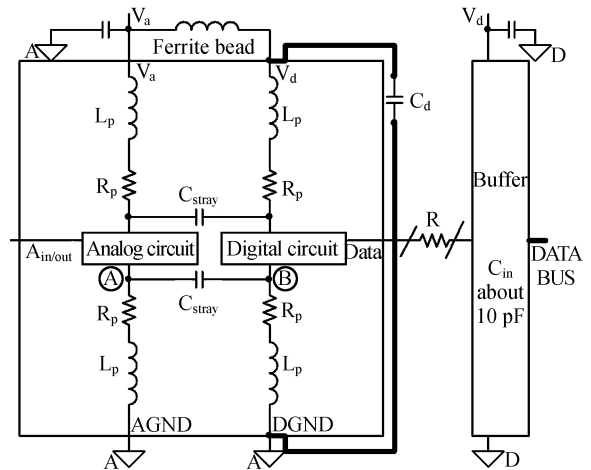


图 6 模拟数字混合电路芯片内部简化模型

Fig. 6 Simple model of mixed signal integrate circuit

图 7 给出了一个较合理的 CCD 成像系统接地方案图。前置跟随及预处理电路部分和 CCD 视频信号处理器接模拟地平面,缓冲电路及数字处理电路接数字地平面。CCD 视频信号处理器

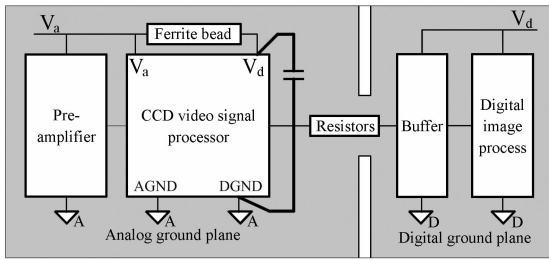


图 7 合理的 CCD 成像系统接地方案

Fig. 7 Proper scheme for the grounding of CCD camera

的数据输出总线通过串联电阻连接到缓冲电路输入端,这个地方的地平面应该保留以防止数据走线穿越分割的地平面而造成干扰^[8]。CCD 视频信号处理器的数字供电电源通过铁氧体磁珠和模拟电源在高频进行隔离,同时其数字电路部分的瞬态电流由供电引脚 V_d 的去耦电容提供,在图 7

中粗线表示其电流。

4 结 论

CCD 成像系统中模拟电路的合理设计非常关键。为此,对模拟前端中各部分功能进行了深入的分析。由于 CCD 输出的信号幅度较小,而在一些应用中需要的模数转换量化位数又高,因此要求系统的干扰及噪声极其低。例如对输出为 1 V 的 CCD 信号进行 12 bit 的量化,那么量化的最低位只有 $244 \mu\text{V}$ 。而相机系统中由于数字电路的高速工作,极易对模拟部分造成干扰,所以合理设计系统带宽,深入分析电源及接地系统及各个信号的电流路径,合理设计 PCB 布局布线,可使干扰及噪声减到最小。测试结果表明,上述方案在实际 CCD 成像系统中性能优越,在像素时钟为 6 MHz 的情况下,系统信噪比可达 54 dB。

参考文献:

- [1] 王庆有. 图像传感器应用技术[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
WANG Q Y. *The Application Technology of Image Sensor*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
- [2] 闫丰,于子江,于晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学精密工程,2006,14(4):709-713.
YAN F, YU Z J, YU X, et al.. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4): 709-713. (in Chinese)
- [3] 李哲,贾欣志. X 射线敏感 ICCD 图像传感器研究[J]. 光学精密工程,2005,13(6):754-758.
LI ZH, JIA X ZH. Research on X-ray sensitive ICCD image sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 754-758. (in Chinese)
- [4] 赵贵军,陈长征,万志,等. 推扫型 TDI CCD 光学遥感器动态成像研究[J]. 光学精密工程,2006,14(2):291-296.
ZHAO G J, CHEN CH ZH, WAN ZH, et al.. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 291-296. (in Chinese)
- [5] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
TONG SH B, HUA CH Y. *Fundamentals of Analog Electronics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 佟首峰,阮锦,郝志航. 几种相关双采样拓扑电路分析[J]. 半导体光电,2000,10:358-362.
TONG SH F, RUAN J, HAO ZH H. Study on topological schemes of correlated double sampling[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, 10: 358-362. (in Chinese)
- [7] KESTER W. *High Speed Design Techniques*[M]. Analog Device Corporation, 1999.
- [8] JOHNSON H, GRAHAM M, 沈立,等. 高速数字设计[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
JOHNSON H, GRAHAM M, SHEN L, et al.. *High-Speed Digital Design*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese)

作者简介:薛旭成(1980—),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要研究方向为光电成像及图像压缩技术。E-mail: xue0818@163.com