

基于反射镜拼接的动态目标成像系统

刘翠¹, 张宇², 武奕楠², 吕增明²

(1. 长春工程学院, 长春 130021; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 以行间转移面阵 CCD KAI-01050 作为传感器件, 设计了一种基于反射镜拼接结构的动态目标成像系统。完成了 CCD 时序控制及驱动电路设计, 利用相关双采样消除视频信号中的相关噪声; 通过分析反射镜拼接中心视场图像降质的产生原理, 建立了图像复原数学模型, 对反射镜拼接中心视场图像进行恢复。整个系统以 FPGA 为核心控制器件, 采用乒乓缓冲结构, 高速并行处理图像数据, 系统延迟满足动态目标成像要求, 复原后中心视场图像信噪比提高了 14.8 dB。

关键词: 图像处理; 图像复原; 反射镜; 面阵 CCD; 动态目标

中图分类号: TN956; O221.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0069-04

A Dynamic Target Imaging System Based on Reflector Splicing

LIU Cui¹, ZHANG Yu², WU Yi-nan², LYU Zeng-ming²

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130021, China;

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

Abstract: With the interline transfer area-array CCD KAI-01050 as the image sensor, a dynamic target imaging system based on a reflector splicing structure was designed. The CCD timing control and driving circuits were designed, and the related noise in video signal was eliminated by correlated double sampling(CDS). By analyzing the reason for image degradation in the central FOV of reflector splicing, a mathematics model for image restoration was established, to restore the image in the central FOV of reflector splicing. With FPGA as the core control device, the whole system adopted a ping-pong buffer structure for high-speed parallel processing of the image data. The system delay satisfies the requirement of dynamic target imaging. After restoration, the SNR for image in the central FOV is improved by 14.8 dB.

Key words: image processing; image restoration; reflector; area-array CCD; dynamic target

1 概述

大视场高分辨率的成像系统能够提供更多的地面目标信息, 有利于目标识别和跟踪, 是现今航空航天领域的主要发展方向^[1]。目前大视场高分辨率的成像系统均采用多片 CCD 拼接的方式弥补单片成像器件分辨率的不足^[2]。常用的拼接方式包括机械交错拼接、半反半透棱镜拼接、反射镜拼接等。各种拼接方式比较后总结如表 1 所示。

从表 1 中可得出, 反射镜拼接具有无色差、体积小、重量轻、稳定度高的优势, 但是反射镜分光边界处

会产生图像降质, 表现为视场中心产生局部暗区, 越靠近中心能量越低, 在一定程度上影响了图像质量, 这也是反射镜拼接成像系统需要解决的重要问题。

表 1 拼接方式比较

Table 1 The methods of splicing

		能量利用	接缝缺陷	拼接刚度	热稳定性	体积重量	拼接精度	拼接长度
机械拼接	直接拼接	高	有	高	高	小	高	
	交错拼接	高	无	高	高	小	高	
光学拼接	多镜头	高	无	一般	一般	高	低	限制
	棱镜拼接	小于 50%	无	好	一般	较小	高	限制
	半反半透	较高	渐晕	较好	一般	较小	高	限制
	全反全透	较高	渐晕	较好	较好	较小	较高	
	反射镜	较高	渐晕	较好	较好	较小	较高	

目前国内航空航天相机采用反射镜拼接结构的型号相机鲜有资料, 大多处在原理验证阶段。如雷华等人建立了金字塔式反射拼接系统, 该系统利用塔形

收稿日期: 2014-07-14

修回日期: 2014-08-08

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20126016)

作者简介: 刘翠(1982—), 女, 黑龙江绥化人, 硕士生, 研究方向为光电成像系统设计。

反射镜将入射光反射到 4 个成像面达到拼接目的。对于拼接处产生的渐晕,该系统通过叠加拼接处重叠区域的数码值的方法消除,该方法虽然能起到一定效果,但是会影响拼接处图像信噪比^[3]。某研究所近年来针对反射镜拼接结构的成像系统研究做了大量前期的工作,已经完成了多片反射镜拼接的原理样机,正是在此研究基础上,本文建立了基于反射镜拼接的成像系统,以两片 CCD 拼接为例,其拼接原理如图 1 所示。

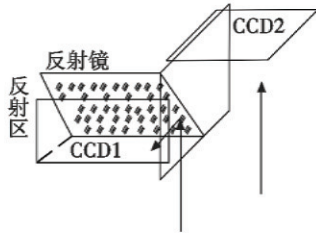


图 1 反射镜拼接原理图
Fig.1 Scheme of reflector splicing

CCD1 和 CCD2 处于严格的光学共面位置,CCD1 接受反射镜反射光,CCD2 接受直接入射光,多片 CCD 拼接结构以此类推。通过对 CCD 成像器件系统硬件时序及驱动电路进行优化设计,利用视频 AD 芯片消除了模拟视频信号的相关噪声,降低了电子学硬件电路对图像噪声的影响^[4]。通过分析成像原理,建立降质数学模型,对拼接后图像进行实时恢复,达到很好的处理效果。

2 成像系统硬件设计

CCD 成像系统结构如图 2 所示。

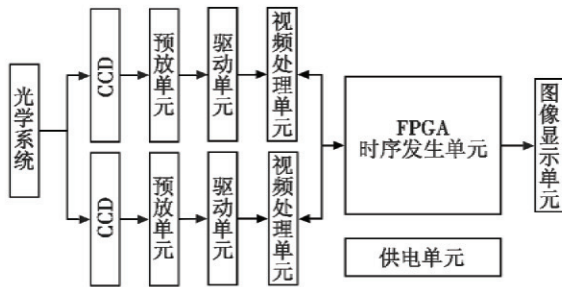


图 2 CCD 成像系统结构
Fig.2 Construction of CCD imaging system

整个系统以 FPGA 为核心处理单元,由时序发生单元、预放单元、驱动单元、视频处理单元、图像显示单元、供电单元组成。系统采用 KODAK 公司生产的行间转移面阵 CCD KAI-01050 作为成像器件,供电单元产生系统需要的所有工作和偏置电压;FPGA 完成 CCD 要求的时序设计后,将时序信号送入驱动单元;驱动单元将满足时序要求的数字信号进行功率增加及电平转换,使其变成满足 CCD 需要的驱动信号后送入 CCD 成像器件;预放单元对 CCD 输出的模拟信号进行阻抗匹配和放大;视频处理单元则对 CCD 输出的模拟

信号进行 A/D 转换;FPGA 完成图像合成及恢复,最后将图像送入显示单元,完成整个成像系统工作流程。

KAI-01050 需要多路偏置电压满足其正常工作,且驱动单元也需要多种钳位电压将时序产生单元输出的 LVTTTL 电平转换为 CCD 需要的驱动信号电平。因此,供电单元的器件选择和原理设计尤为重要。由于 CCD 是噪声敏感类器件,所以在设计电源时,要考虑尽量减少电源噪声,尽量采用低噪声、低功耗的 LDO 作为电源芯片。时序发生单元产生 CCD 工作所需要的时序脉冲及视频处理单元所需要的配置时序,它决定了 CCD 和视频 AD 的工作模式,在 CCD 成像系统中起着非常重要的作用。本系统中面阵 CCD KAI-01050 驱动时序包括垂直转移信号($\Phi V1, \Phi V2, \Phi V3$),水平转移信号($\Phi H1, \Phi H2$),复位信号(ΦRG)和电子快门信号(ΦSUB),设计时各脉冲时序关系应严格满足芯片手册要求。时序设计采用自底向上的设计原则,使用 Xilinx 公司的 ISE 集成开发环境,使用硬件描述语言(VHDL)对各个驱动信号时序关系进行计数设计,从而实现了硬件设计的软件化。KAI-01050 的驱动时序仿真结果如图 3 所示。

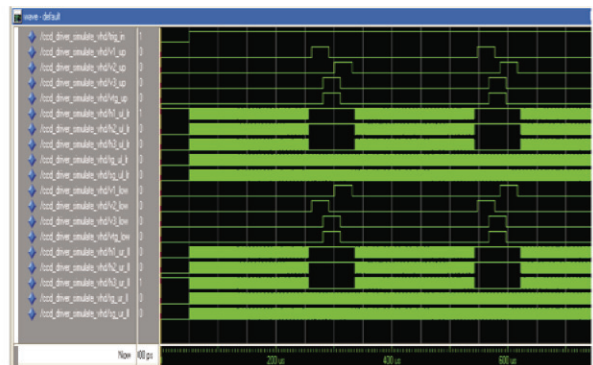


图 3 KAI-01050 的驱动时序仿真结果
Fig.3 Simulation of KAI-01050's driving clock

时序发生单元产生的时序信号为 LVTTTL 电平,无法满足 CCD 工作需要,KAI-01050 驱动信号管脚容性负载较大,需要通过驱动单元增加信号功率,驱动单元设计应考虑时钟频率及信号负载。对于动态目标跟踪而言,必须保证 CCD 工作在高帧频(大于 25 Hz)状态,计算得出像元转移时钟为 30 MHz,水平驱动功率芯片选择 INTESIL 公司的 EL7158,该芯片满足最大像元时钟 40 MHz,最大带载能力为 2200 pF,满足 CCD 设计需求。垂直信号驱动由于容性负载最大达到了 21 nF,且包含三阶电平,普通的集成芯片很难满足,因此采用两个 MOS 场效应管级联的方式,每个场效应管内由一个 PNP 型和一个 NPN 型两个场效应管组成。通过肖特基二极管将时序发生单元产生的时序信号箝位至满足场效应管导通截止状态的工作电压。利用场效应二极

管导通截止特性进行偏置电压的切换,达到设计目的。驱动电路如图 4 所示。

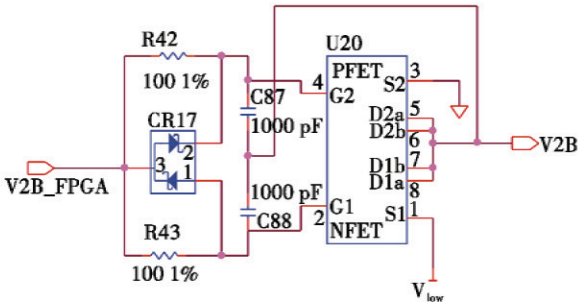


图 4 垂直信号 V1 调制电路

Fig.4 The circuit of the V1 signal

CCD 模拟视频信号从成像器件输出后经过信号隔直,前置放大后进入视频信号处理单元进行相关双采样(CDS)、增益和偏置调节后输出数字信号。本文采用集成视频处理芯片 TDA8783 来处理 KAI-01050 输出的视频信号,TDA8783 具有 10 位精度 A/D、相关双采样电路、8 位可编程增益放大器、偏置可调,自动暗电平校正功能,通过 SPI 接口与核心处理单元 FPGA 相连,可按需求及时更改内部寄存器值,其最大采样率为 40 MHz,满足系统需求。

图像整合单元将两片 CCD 输出的图像数据进行整合拼接,采用 FPGA 内置 BLOCKRAM,以行数据为单位进行乒乓缓存设计,避免了外置存储器在空间上的占用和信号串扰的隐患,实时性好,延迟仅为一行时间。乒乓缓存结构的流程为:首先将第一行 CCD 数据分别写入 RAM1 和 RAM3,随后将下一行图像数据存入 RAM2 和 RAM4 中,同时把第一行的数据从 RAM1 和 RAM3 中读出。如此循环,完成数据流的无缝缓存和处理。结构框图如图 5 所示。

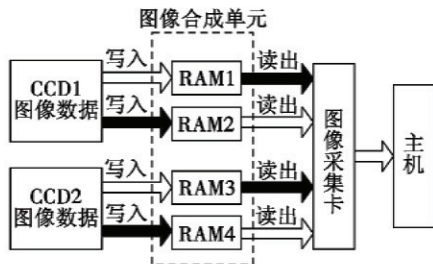


图 5 乒乓结构框图

Fig.5 Block diagram of ping-pong structure

3 成像系统软件设计

图 6 为反射镜拼接的光路示意图,由于光路中放置了反射镜,因此对于像点 A 和 B 而言,有一部分能量没有通过反射镜反射到 CCD 成像靶面,造成了图像降质,表现为图像数码值偏低。当 CCD 像面所在平面的

位置与反射镜的位置固定时,按几何光学理论分析:对于视场角大于 B 对应的视场角 ω 的所有点,所有能量均能通过反射镜反射到反射面 CCD 靶面,所以视场角大于 ω 的所有点可视为没有图像降质现象。

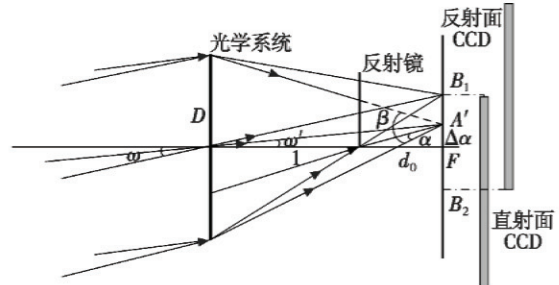


图 6 反射镜拼接的光路示意图

Fig.6 The light path of reflector splicing

根据余弦定理和已知条件可求出 α, β , 即

$$\cos \alpha = \sqrt{(2fd + \Delta aD + 2\Delta a^2) / (4f^2 + 4\Delta a^2 + 4\Delta aD + D^2)} \quad (1)$$

$$\cos \beta = \frac{\sqrt{(4f^2 - D^2 + 4\Delta a^2) / (4f^2 + D^2 - 4\Delta a^2)}}{\sqrt{4f^2 + 4\Delta a^2 + 4\Delta aD + D^2}} \quad (2)$$

式中: f 为光学系统焦距; D 为光学系统口径; d_0 为反射镜到像面的距离; Δa 为像面上图像降质点距离视场中心的距离。

无穷远处的点光源 A 在像面上投影为一个圆斑。反射镜将能量分为两个部分(见图 7), 立体角 β 内的能量被反射到 CCD 靶面, 而由于角 α 内的能量没有被反射, 所以对应的点 A' 的能量仅为整个光斑能量与 α 角所对应面积能量的差值。

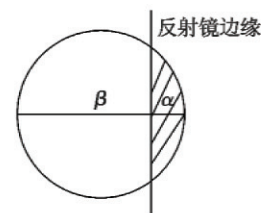


图 7 区域光能量分配示意图

Fig.7 The sketch map of vignetting area's light energy

设光斑圆的直径为 d , 则角 α 和角 β 所对应的光斑面积比为

$$S_{\beta} : S_{\alpha} = \left\{ \frac{d}{4} \arcsin \left[\frac{2\Delta a(l - d_0)}{d_0 d} \right] - \sqrt{\left(\frac{d}{4} \right)^2 - \left(\frac{\Delta a(l - d_0)}{d_0} \right)^2} \cdot \frac{\Delta a(l - d_0)}{d_0} \right\} \quad (3)$$

设 E 为无限远处发光点能量, E' 为成像点 A' 能量, 则

$$E' : E = S_{\beta} : S_{\alpha} \quad (4)$$

$$E' = E \left\{ \frac{d}{4} \arcsin \left[\frac{2\Delta a(l - d_0)}{d_0 d} \right] - \sqrt{\left(\frac{d}{4} \right)^2 - \left(\frac{\Delta a(l - d_0)}{d_0} \right)^2} \cdot \frac{\Delta a(l - d_0)}{d_0} \right\}$$

$$\sqrt{\left(\frac{d}{4}\right)^2 - \left(\frac{\Delta a(l-d_0)}{d_0}\right)^2} \cdot \frac{\Delta a(l-d_0)}{d_0} \quad (5)$$

式(4)为反射面 CCD 渐晕区域内任意一点 A' 获得的能量值。式(4)体现了图像中任意一点原始能量与降质后能量的关系, CCD 成像系统输出图像亮度与入射能量成线性关系, 因此可以通过式(5)计算出降质图像数码值与原始图像数码值的比例关系。本文采用 CORDIC 算法计算反正弦函数^[5], 利用 FPGA 内置的乘法 IP 核完成其他计算, 误差精度达到 10⁻⁴ 数量级, 满足系统需求。

4 实验结果

原始图像如图 8a、图 8b 所示, 系统输出的复原图像分别如图 8c、图 8d 所示。通过视觉比对可以发现, 成像系统在完成了两片 CCD 图像整合输出的同时, 无论是针对室内靶标图像还是外场成像图像, 都可以达到很好的恢复效果, 彻底消除了反射镜拼接方式带来的图像降质影响。

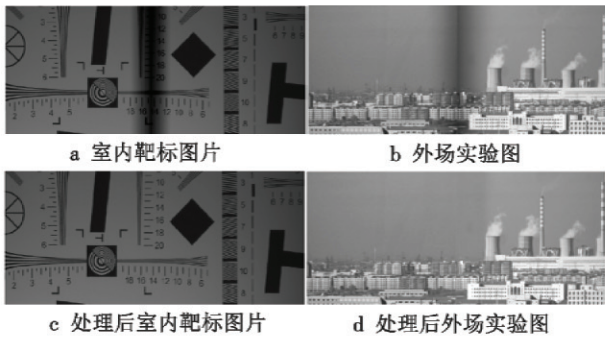


图 8 实验结果图像

Fig. 8 Result of experiment

对于图像恢复的效果, 可以利用图像信噪比(SNR)对处理后图像进行客观评价。信噪比值越大表示图像质量越好, 选取拼接图像中心区域进行计算, 结果如表 2 所示。

表 2 信噪比对比

Table 2 Comparison of the SNR

	图 8a	图 8c	图 8b	图 8d
SNR/dB	12.39	27.04	13.03	28.27

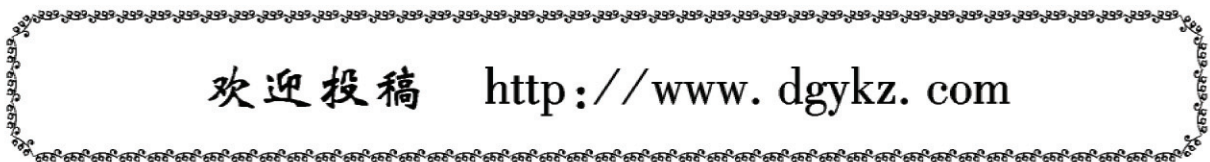
由表 2 可见, 图像的信噪比提高了至少 14.8 dB, 处理后的图像灰度分布均匀, 效果理想。

5 结论

本文建立了一种基于反射镜拼接方式的动态目标成像系统, 从硬件上设计了针对两片面阵 CCD 成像系统的供电单元, 进行了时序和驱动设计, 完成了基本的成像功能。同时, 分析了反射镜拼接方式成像系统图像降质的机理, 按照几何光学能量分配的原理, 建立了退化模型, 利用 FPGA 完成软件设计, 对相机原始图像进行补偿计算, 在满足跟踪实时要求的前提下, 消除了中心视场图像降质现象, 图像信噪比提高至少 14.8 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: 343-414. (WANG Q Y. The application technology of image sensor[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 343-414.)
- [2] 李少军, 肖利平, 高磊. 光电成像制导中地面运动目标检测与跟踪[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(1): 22-30. (LI S J, XIAO L P, GAO L. Detection and tracking of moving targets in photoelectric imaging guidance [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(1): 22-30.)
- [3] 佟首峰, 阮锦, 郝志航. CCD 图像传感器降噪技术的研究[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 140-146. (TONG S F, RUAN J, HAO Z H. Noise reducing scheme on output signal of CCD [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(2): 140-146.)
- [4] 陶明慧, 张宇, 张星祥, 等. 基于退化模型的图像渐晕处理技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2262-2268. (TAO M H, ZHANG Y, ZHANG X X, et al. Vignetting correction technology of images based on degenerate model [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 2262-2268.)
- [5] 达选福, 王怀义, 李涛, 等. 基于集成信号处理芯片的 CCD 相机视频电子学系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29: 30-35. (DA X F, WANG H Y, LI T, et al. Design of electronics system of CCD camera based on integrated signal processor [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2008, 29: 30-35.)


 欢迎投稿 <http://www.dgykz.com>