

基于FPGA的CCD相机响应延迟检测方法设计^{*}闫鑫龙¹ 张斌¹ 褚文博¹ 孟凡军² 张大舜²

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 中国兵器工业集团第五十五研究所 长春 130000)

摘要: 针对测量高速弹丸时对 CCD 相机的响应速度要求极高而相机的响应延迟难以精确测量这一问题, 提出一种基于 FPGA 的 CCD 相机响应延迟检测方法。该方法将触发信号分成两路, 一路直接外触发高速相机, 另一路经 FPGA 模块对信号进行延时触发脉冲激光光源, 通过改变延时时间和不断判断相机是否拍摄到脉冲激光来确定相机的响应延迟。建立了 CCD 相机的探测性能模型对相机的探测性能进行了分析, 最后搭建了实验平台对该测试方法进行了验证。结果表明, 检测出的相机响应延迟为 $0.5\ \mu\text{s}$ 。测试的响应延迟精度达到 $0.1\ \mu\text{s}$, 检测速度快, 工作效率高, 操作简单, 结果准确稳定。

关键词: CCD 相机; FPGA; 脉冲激光; 响应延迟

中图分类号: TN911.71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design on response delay detection of CCD camera based on FPGA

Yan Xinlong¹ Zhang Bin¹ Chu Wenbo¹ Meng Fanjun² Zhang Dashun²

(1. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. The Fifth Research Institute of China Ordnance Industry Group, Changchun 130000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the response speed of CCD camera is very high when measuring high-speed projectile, but the response delay of camera is difficult to measure accurately, a method of CCD camera response delay detection based on FPGA is proposed. In this method, the trigger signal is divided into two channels, one is to trigger the high-speed camera directly, the other is to trigger the pulse laser light source by delaying the signal through FPGA module. The response delay of the camera is determined by changing the delay time and continuously judging whether the camera has captured the pulse laser. The detection performance model of CCD camera is established, and the detection performance of the camera is analyzed. Finally, an experimental platform is built to verify the test method. The results show that the response delay of the camera is $0.5\ \mu\text{s}$. The response delay precision of the test is $0.1\ \mu\text{s}$, the detection speed is fast, the work efficiency is high, the operation is simple, and the result is accurate and stable.

Keywords: CCD camera; FPGA; pulse laser; response delay

0 引言

电耦合器件(CCD)相机的响应速度是评价相机性能一个重要技术指标。而高速 CCD 相机从接收到外触发信号到开始曝光之间的响应时间称为响应延迟, 它是影响响应速度的重要因素^[1-4]。CCD 相机由于其响应速度快, 成像质量好, 像素高等特点已经广泛应用于航空航天、军工等领域。在军工领域的使用中, 特别是测量高速连发弹丸时, CCD 相机在子弹或破片通过测试光幕时触发并能准确拍摄到过靶目标, 需要极低的响应延迟^[5-10]。由于高速 CCD 相机响应延迟导致无法准确捕获到过靶目标的图像的现象

在高速测量时经常发生, 因此精准测量相机的响应延迟具有重要意义^[11-12]。目前传统方法是杨亮等^[13]采用 PIC 系列单片机作为控制芯片和光电二极管及其驱动电路能探测响应延迟在 $1\ \mu\text{s}$ 左右的高速相机。当高速相机工作在探测高速目标的情况时, 需要更加准确的高速相机响应延迟, 上述方法的测量精确达不到要求^[14-16]。

针对如何精确测量高速相机响应延迟这一问题, 本文提出一种基于 FPGA 的 CCD 相机响应延迟检测方法, 本文方法将触发信号分成两路, 一路直接外触发高速相机, 另一路经 FPGA 模块对信号进行延时触发脉冲激光光源; 通过调节延时时间, 使得相机从可以拍到激光光源的激光到刚

收稿日期: 2020-12-29

^{*} 基金项目: 山西省青年科技研究基金(201901D211251)、山西省高等学校科技创新项目(2019L0565)资助

好不能拍到激光,此延时时间即为高速相机的响应延迟。通过该方法能准确快速的测量 CCD 相机的响应延迟。

1 CCD 相机响应延迟测量系统组成

本文使用 CCD 相机响应延迟测量系统检测相机的响应延迟,其结构如图 1 所示。

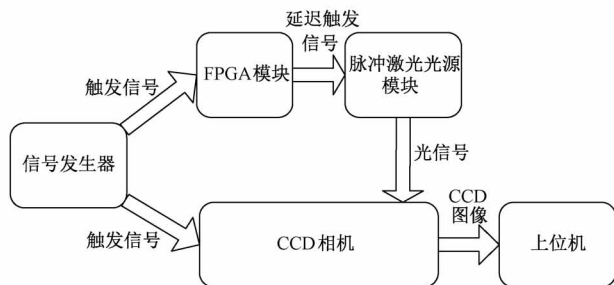


图 1 CCD 相机响应延迟测量系统结构

整个系统由信号发生器 FPGA 模块、脉冲激光光源模块、CCD 相机、上位机 5 部分组成。信号发生器产生上升沿脉冲信号作为触发信号,将触发信号分成两路,其中一路发给待测相机,控制其拍摄照片并传递图像给上位机;另一路经 FPGA 模块设定的延迟时间 t 后发送给脉冲激光光源产生光信号,控制其向待测相机的探测面发射激光。在测量相机的响应延迟时,如果相机一直能拍摄到脉冲激光,则需要继续减小 FPGA 模块的延迟时间,直到相机拍摄不到脉冲激光,就确定了相机的响应延迟。整体流程如图 2 所示。

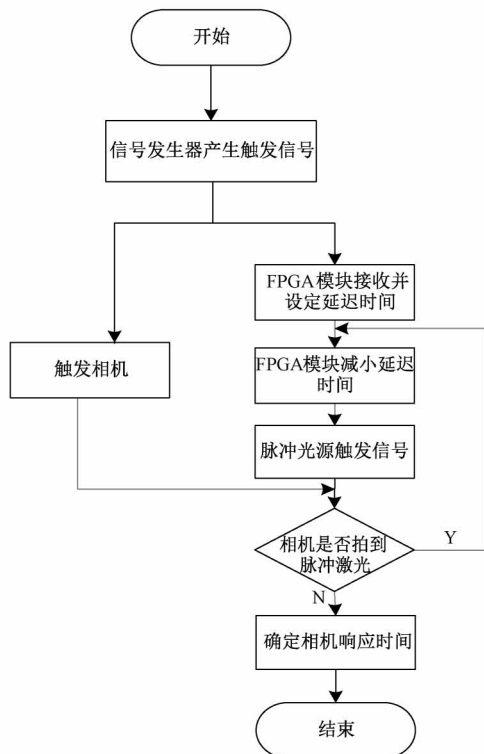


图 2 CCD 相机响应延迟测量系统流程

2 CCD 相机响应延迟检测方法

2.1 CCD 相机响应延迟算法

开始测量 CCD 相机的响应延迟时,相机收到触发信号后触发一次;同时该触发信号经过 FPGA 模块后延时一段时间后再触发脉冲激光,脉冲激光由窄脉冲半导体激光器 SPLLLL90_3 产生,激光波长 905 nm,脉宽 40 ns,而相机曝光时间 20 μ s,激光脉冲时间极短相对相机曝光时间可以看作一个时间点,其时序如图 3 所示。

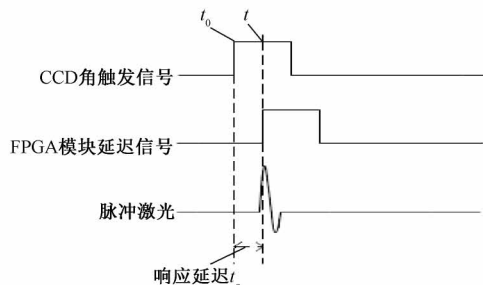


图 3 相机和 FPGA 模块时序图

当信号发生器产生触发信号后,在 t_0 时刻 CCD 相机接收到触发信号上升沿开始触发;FPGA 模块在检测到触发信号上升沿后,延时一段时间在 t 时刻触发脉冲激光。而通过递减 FPGA 模块的延时时间可以得到在某一段时间内,相机从一直能拍摄到脉冲激光,直到在 t_c 最小时,相机不能拍摄到脉冲激光,此时的延时时间 t_c 就是相机的响应延迟时间。整个流程如图 4 所示。

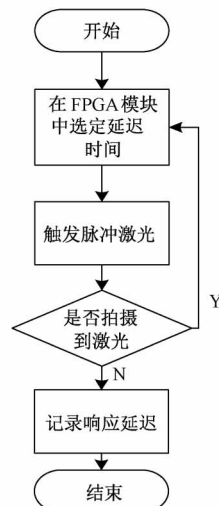


图 4 检测过程流程

为了判断是否拍摄到脉冲激光,首先触发相机在没有脉冲激光情况下拍摄一张图像作为对照图像。然后用测试中拍摄的图像每个像素减去对照图像的对应像素,并判断其是否大于阈值,如式(1)所示。

$$K(x, y) - K_a(x, y) \geq M \quad (1)$$

式中: $K(x, y)$ 、 $K_a(x, y)$ 分别为测试图像和对照图像第

(x, y) 像素灰度值; M 为指定的灰度值阈值。如果该像素灰度值变化超过指定阈值 M , 那么说明该像素接收到了脉冲激光。将所有像素都代入式(1)进行计算后, 将符合公式的像素个数统计起来, 像素个数超过规定的个数 P 则代表该测试图像拍摄到了脉冲激光。整体流程如图5所示。

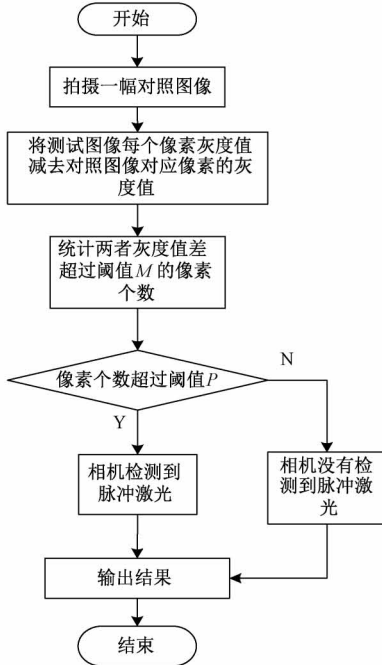


图5 判断是否拍摄到脉冲激光流程

2.2 CCD相机探测性能分析

线阵 CCD 相机接收到的辐照量为 He , 则:

$$He = \frac{E}{S} = \frac{P_r \cdot t}{S} \quad (2)$$

其中, E 为脉冲激光在 CCD 相机探测面的辐射量; P_r 为脉冲激光功率 70 mW, 设置 CCD 相机的积分时间 $t = 20 \mu s$, 激光照射在相机探测面的面积为 S , 激光照射在 CCD 相机探测面上的像素数长度为:

$$n = \frac{d}{w} \quad (3)$$

式中: $d = 23 \text{ mm}$, 为照射在相机探测面上的激光长度; $w = 10 \mu m$ 为线阵 CCD 相机探测面像元尺寸。由于脉冲激光宽度为两个像元, 则有:

$$S = 2 \times n \times w^2 = 2 \times d \times w \quad (4)$$

根据式(2)~(4)可以计算出脉冲激光照射到 CCD 相机探测面的辐射量为:

$$He = \frac{P_r \times t}{2 \times d \times w} \quad (5)$$

计算得到线阵 CCD 相机接收到的辐射量 $He = 304 \ 350 \text{ nJ/cm}^2$, SG-14 相机 4K 分辨率下对不同波长的灵敏度如图6所示。

SG-14 的相机对 905 nm 激光的灵敏度为 $I = 1 \ 000 \text{ Dn/(nJ/cm}^2)$ 。则信噪比为:

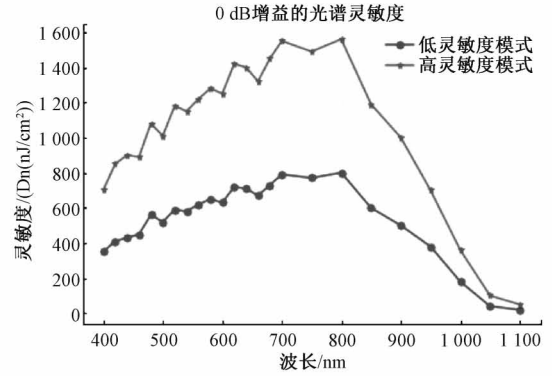


图6 高速相机不同波长的灵敏度

$$SNR = \frac{He \times I}{Z_r} \quad (6)$$

根据线阵 CCD 相机说明书知随机噪声 Z_r 为 10 DN, 那么信噪比 $SNR = 30 \ 435 \ 000$ 。根据计算结果可知该测量系统具有很高的信噪比, 理论上可拍摄到脉冲激光的像, 满足系统方法需求。

2.3 FPGA 模块设计

FPGA 需要完成两个任务: 检测到触发信号的上升沿和产生不同延迟时间的脉冲激光触发信号。

在检测触发信号的上升沿时, 时序逻辑中选择使用两个 D 触发器串联的形式消除亚稳态, 两个 D 触发器的状态用 q_0 和 q_1 表示, 组合逻辑中触发信号的状态 S 使用式(7)进行判断。

$$S = q_0 \& (\sim q_1) \quad (7)$$

由于测试响应延迟时要对延迟时间进行多次调整, FPGA 模块在检测到触发信号的上升沿后会产生 40 路延迟信号, 并分配 40 路 GPIO 口进行输出, 在测试中仅需要接线 GPIO 口位置就调整了延迟时间。40 路延迟时间从 $0.1 \mu s$ 延迟一直到 $4.1 \mu s$ 延迟。

如图7所示为触发信号上升沿检测仿真图, DIN 信号为触发信号, RAISING_EDGE_DETECT 信号为检测到上升沿后的提示信号。如图8所示为 FPGA 延时信号仿真图, 因篇幅有限展示 7 路输出信号, DIN 信号为触发信号, 7 路延时信号相邻两信号间隔为 $0.1 \mu s$ 。

3 试验验证

为了验证 CCD 相机响应延迟测量系统是否能准确测量相机的响应延迟, 搭建了如图9所示的测试平台。系统中相机的采样频率设置为 18.5 k/s , 曝光时间为 $20 \mu s$, 脉冲激光脉宽 40 ns 。除本文方法外, 传统方法以 STM32 单片机为控制芯片作为对照组, 从 $1 \mu s$ 开始依次以 $0.1 \mu s$ 降低延迟时间直至采集不到脉冲激光, 每个延迟时间重复 5 次实验, 记录实验数据分析实验结果如表1所示。

从表1中可以看出, 在使用 FPGA 模块延时的本文方法从 $1 \mu s$ 下降至 $0.6 \mu s$ 的过程中, 重复 5 次实验 CCD 相

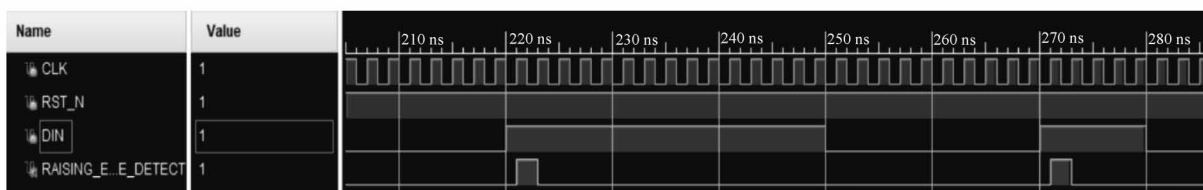


图 7 触发信号上升沿检测仿真图

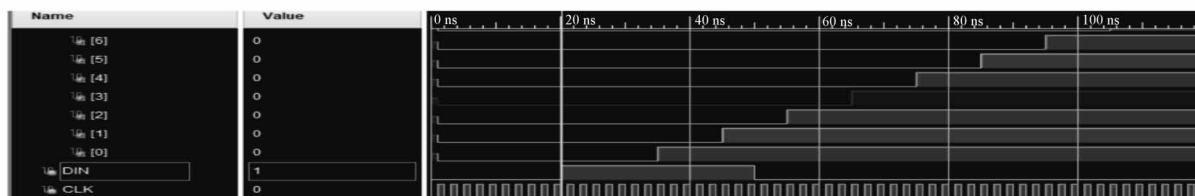


图 8 FPGA 延时信号仿真图

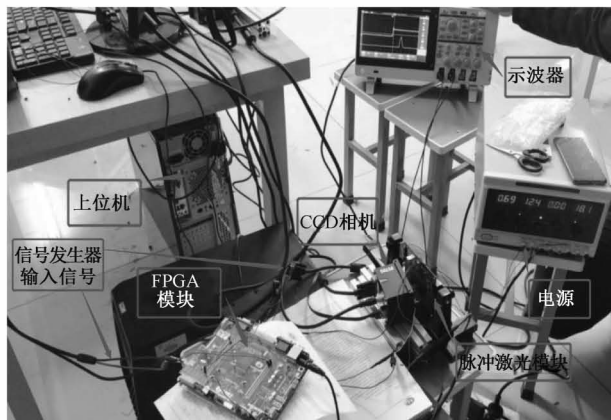


图 9 实验测试平台

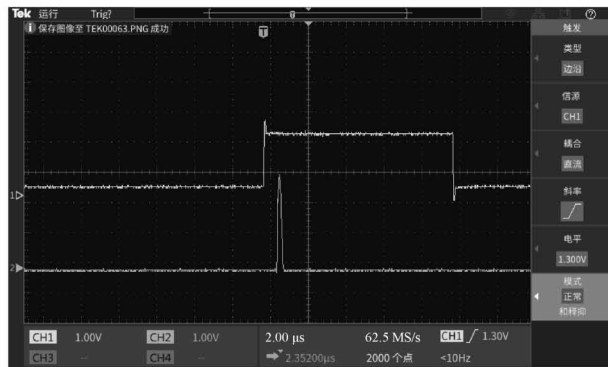


图 10 触发信号与脉冲激光信号波形

表 1 CCD 相机曝光时间 20 μs 采集到脉冲激光次数实验结果

延时时间 $t/\mu\text{s}$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
传统方法	5	5	5	5	5	0	0	0
本文方法	5	5	5	5	5	5	4	4

机一直能拍摄到脉冲激光；而在延时 0.5 μs 时开始拍摄不到脉冲激光。传统方法因为单片机处理时产生了一定延迟，导致响应延时小于 0.5 μs 时能采集到脉冲激光，测量结果误差大。鉴于以上结果，在传统方法探测不了的 0.1 μs 量级响应延迟上，本文提出的基于 FPGA 的测量系统能准确测量。验证本文方法的触发信号与脉冲激光信号波形如图 10 所示，最终 CCD 采集不到脉冲激光的响应延迟为 0.5 μs 。

本文方法对比于传统方法，采用了 FPGA 作为控制单元，同时选取了脉宽 40 ns 的脉冲激光器作为光源器件。使得该测试系统延迟时间精准可控，光源稳定控制方便。测量精度达到 0.1 μs ，结果稳定准确，适于更短响应时间的测量和嵌入式应用，有着广阔的应用前景。

4 结 论

本文介绍了一种基于 FPGA 的 CCD 相机响应延迟检测方法。该方法以 FPGA 为控制核心，选取窄脉冲激光器产生稳定可控的短脉宽激光，结合上位机可以实时判定是否采集到脉冲激光。测量时通过对 FPGA 模块的编程灵活精准依次降低延迟时间，期间通过上位机多次检测相机是否拍到延迟触发的脉冲激光，直到拍摄不到脉冲激光时得到相机的响应延迟。实验结果表明，本文检测出的相机响应延迟为 0.5 μs ，响应延迟精度达到 0.1 μs ，检测速度快，操作简单，结果准确稳定。

在检测过程中，由 FPGA 控制单元和上位机组成的系统可以实时设置曝光时间和延迟时间，使系统检测精度在所需要的范围内。该方法设计简单、控制灵活、可靠性高，适于更短响应时间的测量和嵌入式应用。0.1 μs 的检测精度未必是该方法的最小检测精度，在有需求的情况下，可以控制 FPGA 编程进行更短的响应时间的测量。

参考文献

- [1] 武江鹏, 乔明军, 闫振纲, 等. 战斗部破片场参数测试技术发展综述[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 105-109.

- [2] 杨涛,杨云,李震春.影响线性CCD非接触测径结果因素的研究[J].科技资讯,2020,18(31):89-92,95.
- [3] 郑雪,杨庆华,屠晓伟,等.基于Y型CCD的室内运动目标定位方法[J].仪器仪表学报,2020,41(6):115-123.
- [4] 李亚玲.LED大靶面立靶坐标与速度测试系统研究[D].太原:中北大学,2019.
- [5] 苏健,于正阳,徐磊.基于FPGA的CCD成像电路软件设计[J].电子测量技术,2019,42(9):59-63.
- [6] 李兆新,吕劲松,胡远江,等.线阵相机图像自适应畸变校正方法及在列车成像上的应用[J].电子测量技术,2020,43(15):158-165.
- [7] 朱元元,刘浩,余啸宇,等.基于FPGA的CCD相机控制自适应算法及实现[J].中国电子科学研究院学报,2020,15(6):573-579.
- [8] 郝磊.基于线激光和CCD组合测量的动车车轴表面划痕检测分析[J].电子测量技术,2020,43(13):99-104.
- [9] 杜博军,许勇,李国荣,等.一种超高射速武器连发初速测试方法[J].兵器装备工程学报,2017,38(8):5-9.
- [10] 王宝元,衡刚,周发明,等.火炮立靶密集度测量方法[J].测试技术学报,2011,25(6):529-535.
- [11] 董涛,华灯鑫,李言,等.用于三发弹丸同时着靶的密集度测量方法[J].光子学报,2013,42(1):1329-1333.
- [12] 邢静,彭天亮.光电成像目标光学特性和捕获率研究[J].国外电子测量技术,2018,37(6):7-11.
- [13] 杨亮,张宁,沈湘衡.高速相机采样时序准确性检测方法[J].激光与红外,2016,46(9):1124-1127.
- [14] 陈旭,夏果,马艳,等.基于FPGA的光谱数据采集系统设计[J].电子测量技术,2019,42(14):157-162.
- [15] 郑伟峰.一种在线式图像尺寸测量系统尺寸示值误差的校准方案[J].质量技术监督研究,2020(3):2-5.
- [16] 何煦,姬琪.面阵CCD调制传递函数测试仪器研究[J].电子测量与仪器学报,2014,28(10):1100-1108.

作者简介

闫鑫龙,硕士研究生,主要研究方向为图像处理算法、FPGA等。
E-mail:1513227369@qq.com