

doi: 10.3788/gzxb20134209.1065

# 超高速高性能门控型三分幅相机

江孝国<sup>1</sup>, 王远<sup>1</sup>, 金光<sup>2</sup>, 钟兴<sup>2</sup>, 李洪<sup>1</sup>, 石金水<sup>1</sup>, 徐振<sup>2</sup>, 刘春雨<sup>2</sup>

(1 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

(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:** 针对 $\sim 10^8$  帧/秒或更高速上的超高速分幅摄影, 采用一种成像质量较好的基于会聚光中分光的全口径分光原理, 利用具有高速快门控制功能的像增强器、冷却型科学 CCD 相机、基于大规模可编程集成电路的高速控制器等部件, 研制成功了一种高性能的超高速三分幅相机. 该分幅相机具有三幅图像的超快拍摄能力, 快门速度最高可达 3 ns, 摄影速度则达到  $3.3 \times 10^8$  帧/秒, 并且在较大范围内具有单独调节的能力; 图像幅间间隔同时具有任意调节的能力, 从 0 ns 到秒级; 有效像面面积达到  $\Phi 25$  mm, 图像阵列为  $1\,024 \times 1\,024$ ; 空间分辨率达到 30 lp/mm, 同时具有较好的线性和空间响应的均匀性, 满足了超高速、大幅面的分幅摄影要求.

**关键词:** 分幅相机; 门控型图像增强器; 科学 CCD 相机; 分光棱镜

中图分类号: O463.1; TB86

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)09-1065-6

## Three-frame Framing Camera with Ultrahigh Speed and High Performance

JIANG Xiao-guo<sup>1</sup>, WANG Yuan<sup>1</sup>, JIN Guang<sup>2</sup>, ZHONG Xing<sup>2</sup>, LI Hong<sup>1</sup>,

SHI Jin-shui<sup>1</sup>, XU Zhen<sup>2</sup>, LIU Chun-yu<sup>2</sup>

(1 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China)

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

**Abstract:** Aiming at the framing photography frequency of about  $10^8$  frame/s or above, a kind of 3-frame framing camera with ultra high-speed and high performance is developed and put into operation. The optical principle of the camera is based on splitting the focused imaging light beam in the field of image space. It features good imaging quality and high light energy efficiency. The lens coupled gated image intensifier with high speed shutter control ability, cooled scientific CCD camera and the high speed controller based on large scale field programmable gate array with system trigger and shutter trigger are the main portions. This framing camera can capture 3 frame images with ultrahigh speed of above  $3.3 \times 10^8$  frame/s. The minimum exposure time for each image is about 3 ns and can be independently setup in a wide range of from several ns to s. The frame interval time can also be adjusted at discretion step from 0 ns to second level. The effective image size is  $\Phi 25$  mm and image array is  $1\,024 \times 1\,024$ . The spatial resolution is about 30 lp/mm. The framing camera features good linearity, good response uniformity, and excellent flexibility in applications.

**Key words:** Framing camera; Gated image intensifier; Scientific CCD camera; Splitting prism

## 0 引言

高速分幅摄影的技术发展是一个实际需求与技

术发展相结合的设备研制过程, 其中最重要也是最基础的方面就是高速分幅相机的研制. 一方面追求摄影速度的提高, 另一方面也在追求一次摄影图像

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10675104)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(No. 2011B040211)资助

第一作者: 江孝国(1968—), 男, 研究员, 硕士, 主要研究方向为强流加速器脉冲电子束束参数时间分辨测量及高速摄影系统与设计.

Email: j\_xg\_caep@sina.com

收稿日期: 2013-01-14; 录用日期: 2013-04-02

幅数及画幅、画质的提高. 在超高速的分幅摄影技术中, 实现了分幅功能原理从机械式的转镜相机到完全没有旋转部件的固定光学分光系统的转换, 从而为提高摄影频率和良好的画质奠定了系统基础; 同时采用的快光电子技术的研究成果为系统的高速控制提供了便利, 实现了摄影频率和图像质量的综合性能的大幅度提高. 在高速摄影设备研制领域内, 开展研制工作及取得较好成绩的如早期的英国 Hadland 光学公司、CORDIN 公司等, 研制的分幅相机具有了 8 通道、16 通道、曝光时间可以达到 10 ns 的水平甚至低到 5 ns; 而目前在国际上比较有代表意义的是 DRS 公司的 Ultra4 及 Ultra8、imacon 200 系列、德国 PCO 公司的 hsf 等, 曝光时间达到 10 ns 甚至 3 ns(可选配)的水平, 幅面一般为  $\Phi 18$  mm, 一次可以拍摄多幅, 并且其他性能指标如线性度、响应的均匀性、噪音等也比较高<sup>[1-2]</sup>. 国内在 20 世纪 50 年代就开始开展了高速摄影技术及设备的研制工作, 主要在光学机械式高速摄影设备(各种转镜式高速相机)方面取得了较大成果, 接近或达到国际先进水平<sup>[3]</sup>, 具有代表意义的单位如中国工程物理研究院流体物理研究所、西安光机所、深圳大学等<sup>[4-6]</sup>. 流体物理研究所由于科学研究的需要而不断深化在高速摄影技术方面的研究, 不仅研制了一些超高速的具有针对性的测量系统<sup>[7-8]</sup>, 同时还完成了各种高性能的高速分幅相机的研制, 并不断提高各方面的性能, 如曝光时间可以达到约 3 ns 的水平, 一次可以拍摄多达 8 幅图像, 摄影频率已超过  $10^8$  frame/s 等.

本文在已研制成功的测量系统及设备的基础上<sup>[6,8]</sup>, 通过完善系统结构及参量设计, 针对需求进一步研制了一种超高速的高性能的三分幅相机. 该三分幅相机采用了会聚光中分光原理, 这种分光原理可以利用全口径的光线进行成像, 具有成像质量好的优点. 在光学系统结构设计上, 将主物镜的后主平面尽量后移以便在成像空间留下足够的空间安装

多个分光棱镜, 而达到将成像光束在空间上进行分开分光的目的, 最终满足高质量的分幅成像的要求. 在分幅的时间顺序控制方面, 主要利用了门控型图像增强器的快门控制功能<sup>[5]</sup>达到曝光时间的控制要求; 同时基于大规模可编程集成电路研制了一套多台相机的序列快门控制技术系统, 满足了门控型图像增强器在时间序列上顺序分开的控制要求, 达到最终获得高速分幅相机拍摄图像的分幅功能. 该分幅相机的特点是快门宽度、幅间间隔时间的调节是独立的, 曝光时间最小可以低于 3 ns; 幅间间隔时间可以根据使用要求任意调节, 最小可以到 0 ns(即各幅图像完全同步), 最长则可以到秒级以上; 触发延迟时间约 87 ns, 抖动小于 0.5 ns, 满足精密的时间测量触发要求.

## 1 光学系统原理

利用光学分光系统进行分光的原理主要有两种: 平行光中分光和会聚光中分光, 如图 1 和图 2.

在图 1 所示的平行光中分光原理的光路中, 物体首先经过主物镜进行成像, 并且该成像面实际上是后面的分光光学系统第一中继透镜的前焦平面, 这样进入分光系统后的成像光线变为平行光束, 这些平行光束再由分光系统(如分光棱锥、分光平板或分光棱镜)进行分光而获得相应的在空间上分开的成像平行光束, 最后这些分开的成像平行光束进入不同的成像通道进行成像达到分幅成像目的. 由于这种方式是对成像过程中产生的平行光束进行分光, 故称之为平行光束分光原理. 目前, 高速多幅分幅相机基本采用这种方式进行分幅成像, 只不过在采用分光元件上有所不同. 幅数较多的一般采用多边分光棱锥<sup>[5-6]</sup>, 幅数较少的则采用分光棱镜<sup>[8]</sup>, 同时也导致光学系统结构有所不同. 采用棱锥的光学元件加工难度大, 多路的光学元件加工及性能要求一致性高, 光学系统安装调校工作较为复杂, 且安装准确度要求较高, 同时由于边沿光线成像质量差、光

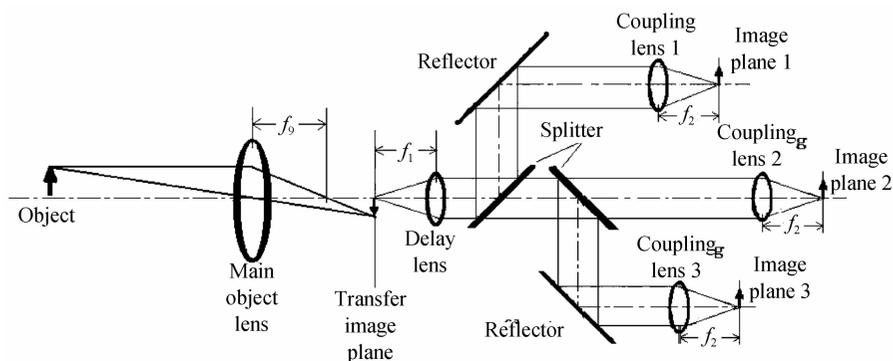


图 1 平行光中分光原理

Fig. 1 The parallel imaging light beam splitting principle

学参量设计时修正较难的原因,其光学系统的成像质量一般却相对较低<sup>[9]</sup>,最终仅仅达到十几线对.

在图 2 所示的会聚光中分光原理的光路中,物体的成像光束在像空间用分光元件直接分光,然后再成像在各个像平面上,遵循几何光学的成像原理.这种分光原理简单,其特点是利用了全部的成像光线束,光能量利用率高,并且各成像光路在光学设计时可以较容易地进行独立校正,成像质量可以满足较高的要求,同时光学系统的数值孔径可以做得较大,具有较多的优势.这种光学系统的主要限制是镜

头的焦距,由于在镜头后的像空间进行分光,因此要求其像空间的工作距离要比较大,对应的镜头焦距也要大才行.本三分幅相机的工作镜头满足这种要求,故采用了这种结构.

### 2 结构设计

图 3 为三分幅相机的光学系统原理及结构示意图.基于图 3 原理的三分幅相机的系统结构及系统主要组成如图 4.

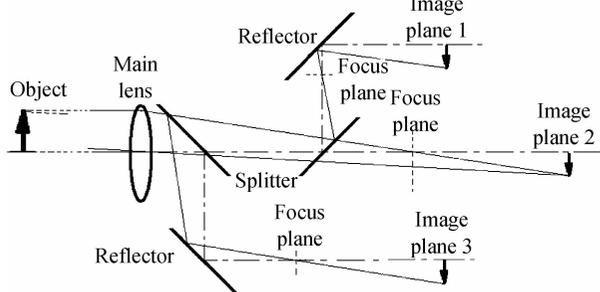


图 2 会聚光中分光原理

Fig. 2 The focused imaging light beam splitting principle

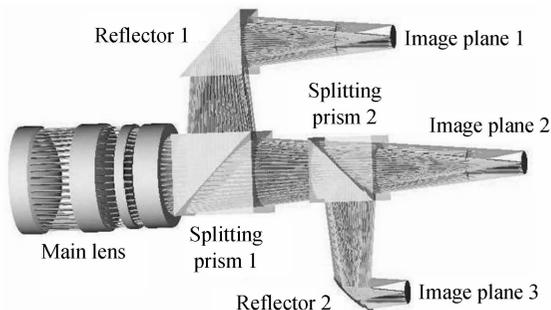


图 3 分幅相机的光学系统原理

Fig. 3 The optical principle of the framing camera

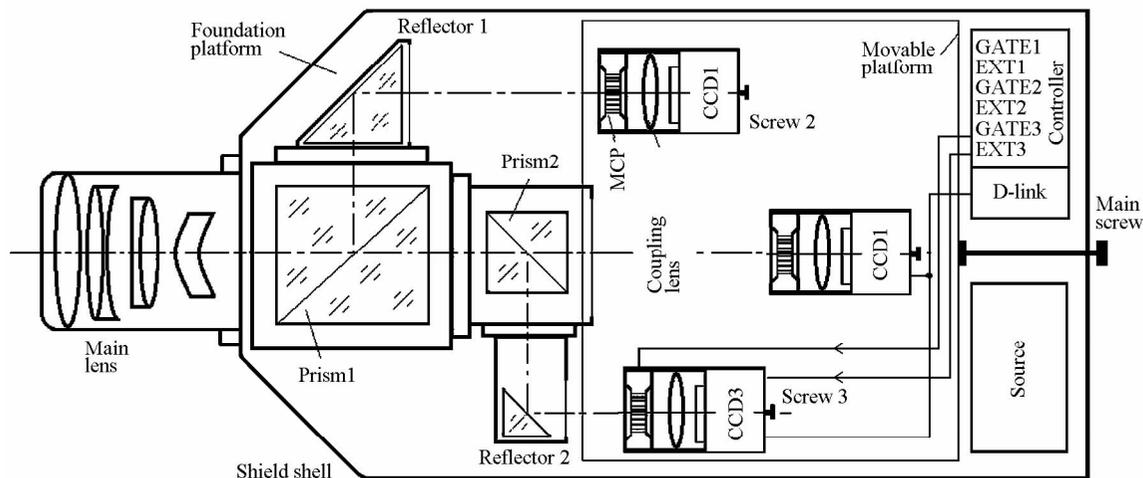


图 4 分幅相机的系统结构

Fig. 4 The structure of the framing camera

在该分幅相机中,所有的光学元器件(镜头、棱镜)均固定安装在一个大的基板上以确保光学性能的稳定.三台 ICCD 相机则安装在另一块沿光轴方向可在较大范围内移动的平板上,该平板通过精密的导轨与基板相连接,确保像平面在垂直与水平方向上的正确性.位于中间位置的 ICCD 相机固定,而两边的 ICCD 相机再通过一个较小的精密导轨安装在上述可移动平板上,并可以在约 3mm 的范围内沿光轴移动以便使各成像面位置相同,将三台 ICCD 相机的光敏面精密地调节在同样的像面位置后紧锁其固定螺丝可以确保分幅相机的各像面的一

致性调节功能得到较好的完成,满足分幅相机成像的简便调节要求.由于加工、安装的原因,分幅相机的各幅图像位置并不是完全重合的,多幅图像的进一步的位置配准需要用软件实现<sup>[10]</sup>.

### 3 主要光学性能

图 5 依次显示了三分幅相机的主要光学性能:光学传递函数、像元的能量收集能力、成像畸变等.

该分幅相机的主物镜焦距为 328 mm,口径为 150 mm,为可更换式.分幅相机的光学系统的分辨率达到到了 200 lp/mm 以上,同时配备有其他焦距的

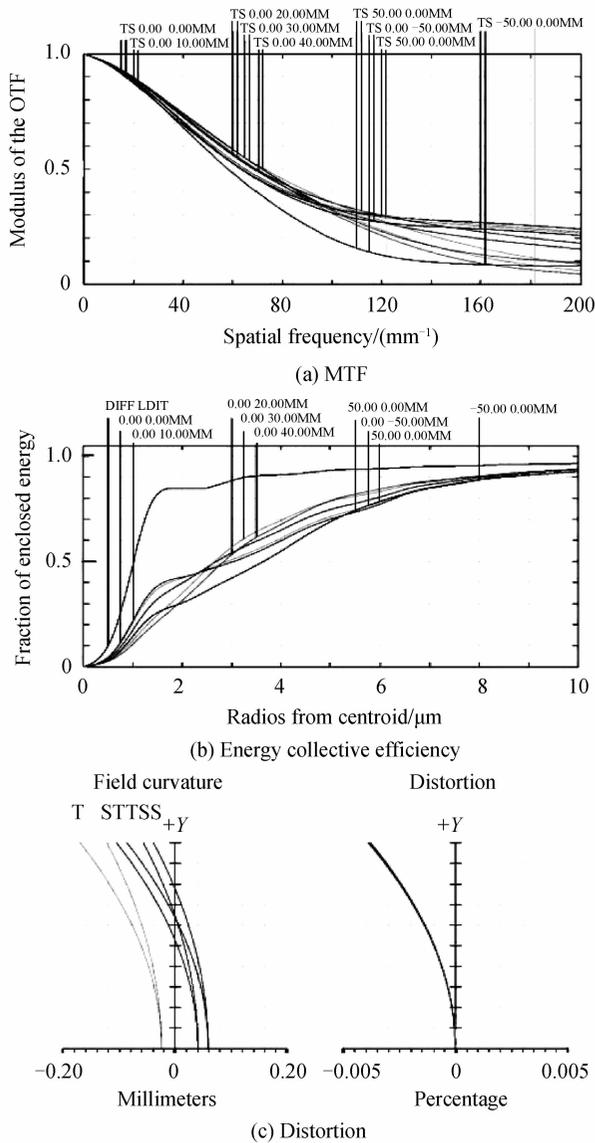


图5 分幅相机的主要光学性能  
Fig. 5 The main optical performances of the framing camera

主物镜镜头. 工作的主要波段为 410~500 nm, 其他范围也可以较好地工作.

分幅相机光学系统的 MTF 在 20 lp/mm 时达到了 0.9 的较高水平, 与其搭配的 ICCD 相机像元的光能量收集能力达到了较好的配合, 满足了对于某些测量的特殊使用要求<sup>[8]</sup>. 当与 ICCD 相机配合使用时, 由于 ICCD 相机本身的空间分辨率较低, 将会大幅度地降低整个分幅相机系统的空间分辨率.

分幅相机系统成像的光学几何畸变在全视场范围内达到了小于 0.005% 的水平.

#### 4 控制系统及数据传输结构

三分幅相机的主要关键部件还包括了三台 CCD 相机、三只门控型图像增强器构成的 ICCD 相机. 控制系统主要针对这些关键部件的工作流程进行控制, 是三分幅相机的重要组成部分; 不仅必须产生满足严格要求的各种控制信号, 如多台 CCD 相机的同步外触发、极快的门控型图像增强器光电阴极的导通与关闭, 同时还要满足图像数据及 CCD 相机控制参量的设置等功能要求. 图 6 是分幅相机工作时控制的流程.

分幅相机的控制系统包括了两大部分: 比较标准的 d-link 和专门研制的控制单元.

d-link 主要负责完成分幅相机的数据传输及交换功能(包括各 CCD 相机的工作参量设置、获取的图像数据远程传输), 通过网络结构的形式完成.

专门研制的控制单元承担着分幅相机的关键控制功能, 主要产生系统的同步触发信号、严格按照设置要求的快门控制信号. 分幅相机正常工作时需要两路输入触发信号: 系统的外触发同步信号 EXT

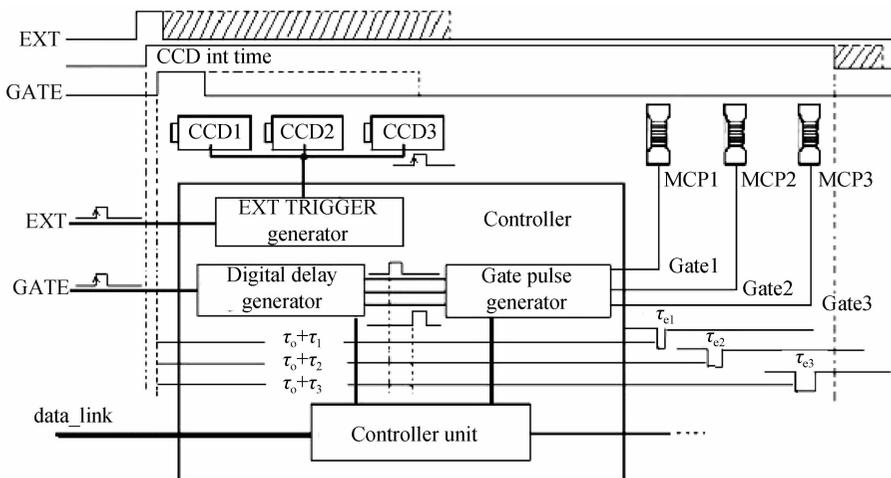


图6 分幅相机工作的控制流程  
Fig. 6 Flow chart for the camera system controls

和图像增强器的门控触发信号 GATE. 外部触发信号 EXT 经控制单元产生三路同步的触发信号,主要用于分幅相机中三台 CCD 相机的触发,启动 CCD 相机工作,并同时进入其光积分周期,这是分幅相机工作的第一步. 在 CCD 的光积分周期内(一般设置为几 ms 即可满足大部分的实验要求,也可根据多个实验事件的总间隔时间确定),在正确的时刻输入门控触发信号 GATE,启动数字延迟发生器、门宽控制信号发生器等工作,并按照预先设置好的控制要求产生控制门控型图像增强器光电阴极导通的窄脉冲信号  $\tau_{e_1}$ 、 $\tau_{e_2}$ 、 $\tau_{e_3}$ ,而  $\tau_{e_1}$ 、 $\tau_{e_2}$ 、 $\tau_{e_3}$  的宽度代表了相应各幅图像的曝光时间;只要  $\tau_{e_1}$ 、 $\tau_{e_2}$ 、 $\tau_{e_3}$  产生的时间落在 CCD 光积分时间内并与正确的实验事件发生的时刻同步,分幅相机就可以准确获得相关分幅图像的数据. 本控制单元的特点是数字延迟发生器、门宽控制信号发生器是独立进行工作的,各幅图像的固有延迟时间  $\tau_0$  与其曝光时间、幅间间隔时间是完全无关的,克服了已有系统设计的缺点<sup>[6]</sup>,各延迟时间  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$  和门宽时间  $\tau_{e_1}$ 、 $\tau_{e_2}$ 、 $\tau_{e_3}$  等参量是可以单独进行设置的,使分幅相机具有了曝光时间、图像幅间间隔时间单独可调的特点,不仅满足了参量设置时的简单操作要求,而且满足了精密延迟设置的要求.  $\tau_0$  固定不变,约 87 ns,其抖动小于 0.5 ns. 分幅相机所有的输入输出信号采用光信号,

以解决分幅相机应用时的干扰问题.

## 5 其他主要性能

### 5.1 曝光时间

图 7 是在间隔时间为 30 ns 下的快门控制信号的典型波形,对应的快门宽度分别为 3 ns、5 ns、7 ns 和 10 ns.

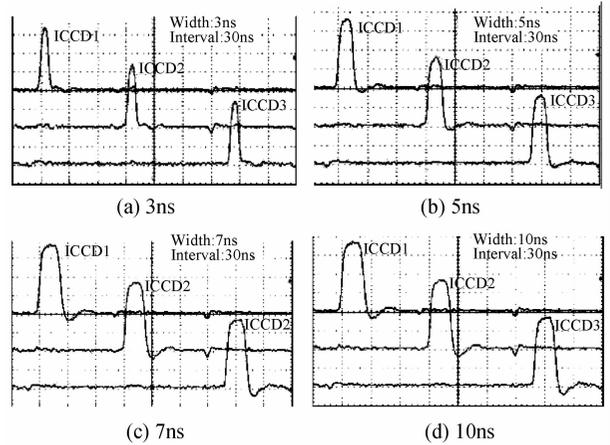


图 7 分幅相机的典型曝光时间

Fig. 7 The typical exposure time of the framing camera

表 1 是针对快门宽度设置为 3 ns 时的各快门宽度的测量结果,其标准偏差均小于 0.05 ns,说明稳定性还是较高的;在其他各档位下的测量结果的标准偏差水平与此相当.

表 1 分幅相机的曝光时间测量结果

Table 1 The exposure time results of the framing camera

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mean	Standard deviation
CH1	2.957	2.939	2.959	2.918	2.947	2.933	2.947	2.976	2.951	2.961	2.949	0.016
CH2	3.073	3.022	3.006	3.002	3.031	3.068	3.006	3.034	3.044	3.008	3.029	0.026
CH3	3.038	3.032	3.027	3.027	3.052	3.068	3.019	3.037	3.022	3.046	3.037	0.015

在小于 3 ns 的快门速度时,分幅相机仍然具有一定的拍摄能力,只是图像边沿与图像中心的灰度差别变大而已.

### 5.2 幅间间隔时间及摄影频率

由于数字延迟发生器的各通道工作是独立的,理论上的幅间间隔时间可以是任意的,同时还可以是不等间距的,也可以是同步的(相当于各幅图像同时拍摄,在重要的实验时为了保证可靠,可以采用这种方式.),取决于其工作的步进;但由于曝光时间的限制,一般要求幅间间隔时间的设置值大于曝光时间,因此,幅间间隔时间最小为 3ns 左右,对应的摄影最高频率约为  $3.3 \times 10^8$  帧/秒.

### 5.3 分幅相机的空间分辨率

建立的分幅相机分辨率检测系统如图 8. 在主物镜的工作距离(1.2m)上放置 4 号标准分辨率

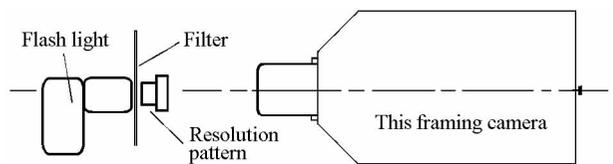


图 8 分幅相机的空间分辨率测量装置

Fig. 8 The setup of spatial resolution measurement of the framing camera

板,并用闪光灯进行脉冲强光照明,在曝光时间为 3 ns 的情况下对高速分幅相机的空间分辨率进行检测,所得各通道的典型分辨率图像如图 9;对于第一通道,分辨率板的第 14 号线对(13.2 lp/mm)是可以明确分辨的,为了方便显示,将其做反色处理后如图 9,按照照相的光学布局参量计算,其对应的等效到像面上的空间分辨率达到 35.1 lp/mm,以此类推,第二通道的空间分辨率达到 31.4 lp/mm(第 12

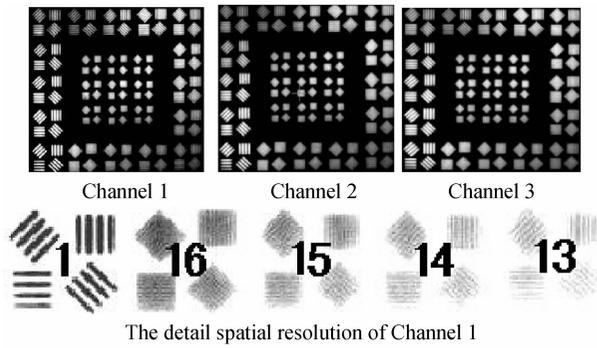


图9 分幅相机的空间分辨率测量图像结果

Fig. 9 The image results of spatial resolution of the framing camera

表2 分幅相机各通道典型噪音

Table 2 The typical noise of the framing camera

Channel NO.	Temperature/( $^{\circ}\text{C}$ )	Pixel position	Dark background	Standard deviation	Equivalent noise
CH1	-10	(512,512)	310.9	2.3	9.2
CH2	-10	(512,512)	305.8	2.8	11.2
CH3	-10	(512,512)	307.9	2.6	10.4

## 6 结论

已完成研制的超高速高性能的三分幅相机,采用了全口径的会聚光中光束分光的原理,具有成像质量好、效率高的特点,分幅相机的空间分辨率达到了30 lp/mm 以上的水平;较高的灵敏度、较低的噪音水平使分幅相机具有了较好的弱光拍摄能力;高达3 ns 的曝光时间使其具有了在超高速分幅摄影领域内获得广泛应用的能力;结合先进的大规模可编程集成电路的应用,分幅相机获得了在曝光时间、幅间间隔时间很好的可以独立进行控制的性能,满足了目前各种复杂的应用控制要求,并在强电磁干扰及X射线辐射环境里获得了成功的应用,表现出了较高的稳定性、可靠性和优良的性能,达到了超高速高性能分幅相机研制的目的。

### 参考文献

- [1] DRS's ULTRA 8 HIGH-SPEED IMAGING SYSTEM[EB/OL]. [2012-10-01]. <http://www.drsdigitalimaging.com/>.
- [2] 12 bit ultra speed intensified imaging[EB/OL]. [2012-10-01]. <http://www.pco-tech.com/categories/high-speed-cameras/hafc-pro/>.
- [3] 谭显祥. 光学高速摄影测试技术[M]. 北京:科学出版社,1992:1-5.
- [4] WENG Yin-sheng, WENG Fang-yu, WU Guo-jun, et al. High precision measurement of rotating mirror's speed of high-speed photography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 061202.  
翁寅生,翁方煜,吴国俊,等.超高速摄影机转镜的高准确度速度测量研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 061202.
- [5] SHAN Bao-zhong, GUO Bao-ping, NIU Han-ben. Multi-channel nano-second framing camera with gate selection[J].

号线对可分辨,11.8 lp/mm),第三通道的空间分辨率达到33.2 lp/mm(第13号线对可分辨,12.5 lp/mm).

### 5.4 噪音性能

在暗光的环境下 CCD 工作温度设定在 $-10^{\circ}\text{C}$ ,选取图像中心点位置的像元完成了分幅相机各通道的噪音测量,并采用其50次暗本底灰度的标准偏差值作为其噪音的.表2是典型的噪音测量值示意,各通道的噪音约在10个电子的水平.因此,分幅相机的等效背景照度也是很低的,适合光信号很弱的图像的拍摄。

*Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(12):1963-1968.

单宝忠,郭宝平,牛憨笨.多通道门选通纳秒分幅相机[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(12):1963-1968.

- [6] JIANG Xiao-guo, GUO Bao-ping, DENG Jian-jun, et al. High speed multi-frame gated camera for electron beam parameters measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(5):99-103.

江孝国,郭宝平,邓建军,等.用于电子束参量测量的高速分幅相机[J]. *光电工程*, 2006, **33**(5):99-103.

- [7] JIANG Xiao-guo, DENG Jian-jun, SHI Jin-shui, et al. Time-resolved measurement system for electron beam profile of high current LIA[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(7):1070-1074.

江孝国,邓建军,石金水,等.具有时间分辨能力的强流电子束束剖面测量系统[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(7):1070-1074.

- [8] JIANG Xiao-guo, DONG Xiao-na, WANG Yuan, et al. Design of the instantaneous measurement system based on optical transition radiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(9):2147-2150.

江孝国,董晓娜,王远,等.瞬态光学渡越辐射测量系统的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(9):2147-2150.

- [9] PENG Xiao-xun, YE Yu-tang, WU Yun-feng, et al. Design and analysis of optical splitting system for digital high-speed multi-frame gated camera[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(1):52-54.

彭小勋,叶玉堂,吴云峰,等.数字高速分幅相机中光学分幅系统的设计与分析[J]. *光学与光电技术*, 2008, **6**(1):52-54.

- [10] JIANG Xiao-guo, WANG Yuan, ZHANG Kai-zhi, et al. Calibration method for non-uniformity between multiple images from a high speed multi-frame CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 531-535.

江孝国,王远,张开志,等.高速分幅成像系统中多路图像性能不一致的校正方法研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):531-535.