

doi:10.3788/gzxb20174604.0411002

分幅相机像面一致性分析及分幅方法改进

谢洪波, 方春伦, 杨磊, 江敏, 孟庆斌, 毛晨盛

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息科学技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 为了提高分幅相机的像面一致性, 从分孔径和分振幅两种分幅方法的原理出发, 分析了物体辐射特性影响像面一致性的原因. 基于光纤传像器件匀光作用, 提出了一种提高像面一致性的方法, 并以棱锥分孔径实现六分幅为例, 在 LightTools 软件中仿真了光纤面板厚度、纤芯直径、光线入射角度等参量对像面一致性的影响. 结果表明, 当光束主光线在光纤前端的入射角在 $\pm 15^\circ$ 内变化时, 增大光纤面板厚度或减小纤芯直径, 可使得六幅像面能量差小于 0.3%. 基于光纤传像器件的棱锥分幅结构, 可有效提高分幅相机的像面一致性.

关键词: 光学设计; 分幅相机; 像面一致性; 光纤传像器件; 棱锥; 棱镜

中图分类号: TN202; TH74

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)04-0411002-5

Analysis of Image Consistency for Framing Camera and Improvement of Framing Method

XIE Hong-bo, FANG Chun-lun, YANG Lei, JIANG Min, MENG Qing-bin, MAO Chen-sheng
(Key Lab of Opto-electronic Information Science & Technology, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to improve the image consistency, the factors influencing the image consistency was analyzed according to the principle of aperture-divided and amplitude divided method. In addition, one approach for improving the image consistency based on the fiber optics imaging was presented. Taking the six-frame divided by the pyramid as an example, the influences of the thickness, core diameter of fiber face plate and incident angle on image consistency were simulated by Lighttools. The results show that energy difference of the six image planes could be less than 0.3% with increasing of the thickness or decreasing of the core diameter of the fiber, when the incident angle ranges from 15° to -15° . Based on the fiber optics imaging, the optical frame-divided structure by the pyramid can effectively improve the image consistency of framing camera.

Key words: Optical design; Framing camera; Image consistency; Fiber optics imaging; Pyramid; Prism

OCIS Codes: 110.2350; 110.2960; 060.2310; 060.2400

0 引言

数字高速分幅相机利用分光元件分束形成同一视场的多幅像面, 结合变像管门选通技术实现时间放大作用并提高相机拍摄速度来记录一定空间范围内的瞬态现象^[1-2], 其广泛应用于科学研究、武器探测、体育竞技和医学检验等多种领域^[1,3-5]. 分幅相机光学成像部分一般分为物镜、中继镜头和分幅结构三部分, 物镜对物体进行一次成像, 中继镜头对物镜的像进行二次成像, 并由分幅结构实现分幅, 各幅像面经光路转折后由增强电荷耦合器(Intensified Charge Coupled Device, ICCD)接收, 通过时序电路控制各光路的拍摄顺序最

基金项目: 国防支撑项目资助

第一作者: 谢洪波(1969-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学设计与光显示技术. Email: hbxie@tju.edu.cn

通讯作者: 杨磊(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光学设计与成像、量子光学技术等. Email: yanglei@tju.edu.cn

收稿日期: 2016-10-17; **录用日期:** 2016-12-02

<http://www.photon.ac.cn>

终得到物体的瞬态二维信息。

随着分幅相机技术不断深入各应用领域,人们对其光学性能的要求也越来越高,尤其是多幅像面的一致性和照度均匀性.像面一致性主要受分幅结构的影响^[6],目前国内外所研制的分幅相机大多采用孔径分割法(如棱锥分幅)或振幅分割法(如棱镜分幅)实现分幅^[7-8],两种方法的分光原理不同,在不同条件下都存在像面一致性问题。

本文从分析棱锥与棱镜的分光原理出发,总结棱锥与棱镜不同分光方式的特点,针对棱锥分幅和棱镜分幅两种方法,分别讨论影响像面一致性的因素,最后提出利用光纤传像器件提高分幅相机像面一致性的方法。

1 棱锥分幅方法

棱锥分幅方法中,分光棱锥位于中继镜头的孔径光阑处,对孔径进行均等分割实现分幅成像.图 1(a)是孔径光阑内置分光方式,棱锥对平行光分光,系统为近似对称结构;图 1(b)是孔径光阑外置分光方式,分光棱锥对会聚光分光,系统为非对称结构.后者与前者相比,设计难度较大,但是系统的同轴性好,容易保证分幅相机的光学性能^[9-10]。

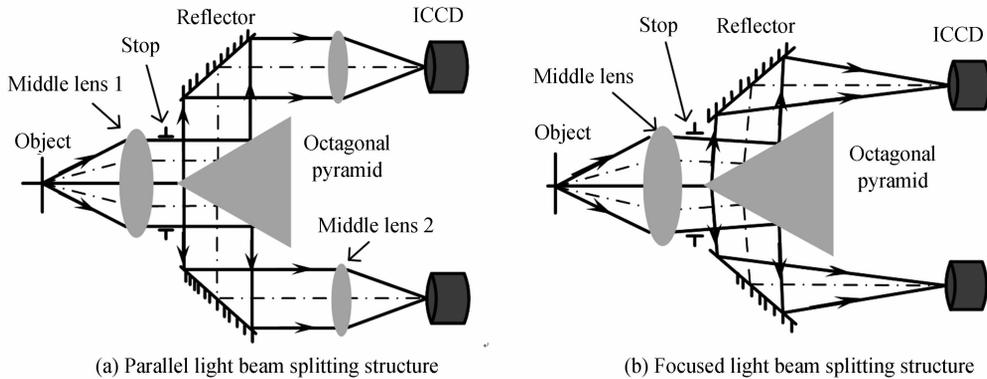


图 1 棱锥分光光路图

Fig. 1 Sketch of optical system divided by octagonal pyramid

选用棱锥作为分幅元件时,需要考虑物体辐射能量的空间分布对像面一致性的影响.当物体非定向发光或者物体是漫反射体,即成像光束可以充满中继镜头孔径光阑时,经棱锥分孔径后,虽然每幅像面的光来自孔径光阑不同位置,但是各像面的相对照度不变,此时使用棱锥分光得到的像面一致性较好;当物体发光角度小或者物体不是漫反射体,即每个物点的成像光束不能充满中继镜头孔径光阑时,如图 2,棱锥分孔径将引起像面相对照度的变化,从而导致像面一致性变差,甚至造成某个像面残缺^[4].可以采用分振幅方法(如棱镜分幅)来克服这一问题,但在相同分幅数情况下系统体积会稍有增大。

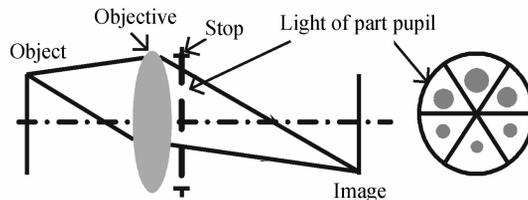


图 2 采用棱锥分光方法对非漫反射体分幅成像示意图

Fig. 2 Sketch of imaging to mirroring reflecting using polyhedral mirror position mode

2 棱镜分幅方法

棱镜分幅属于全口径分振幅方法,如图 3 所示,一般使用非偏振分光棱镜作为分光元件^[11],不存在孔径分割,分幅后每个像面包含孔径光阑全部位置的光线,即像面一致性不受拍摄物体辐射能量空间分布的影响.棱镜分光也分为平行光分光和会聚光分光两种方式,其分光特点与棱锥分光特点类似^[9-10]。

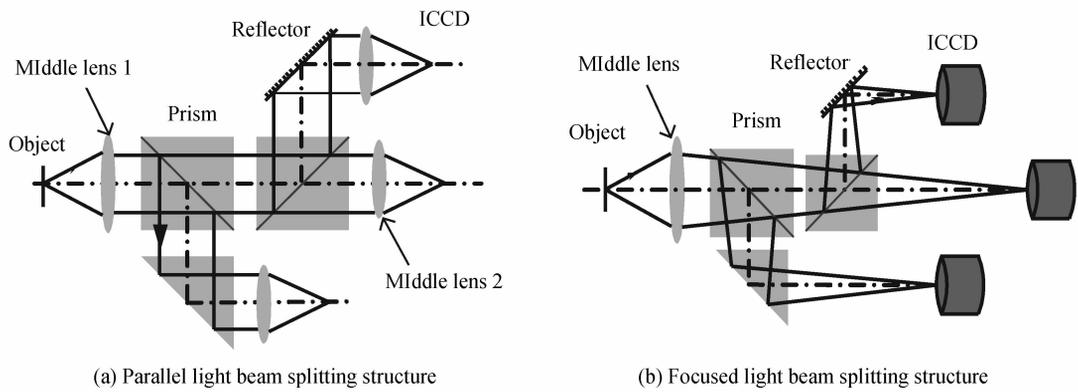


图3 棱镜分光光路图

Fig. 3 Sketch of optical system divided by prism

选用棱镜作为分幅元件时,需要注意光谱范围对棱镜分光比的影响.当光谱范围比较窄时,可以忽略波长漂移和光束偏振特性对分光比的影响,此时多幅像面的相对照度与分光之前相同,像面一致性好.当光谱范围比较宽时,从膜系设计到镀膜工艺都无法让整个光谱范围的分光比为某一恒定值^[12].图4是一种典型的宽光谱分光曲线,在整个光谱范围内,分光比不是恒定值;此外,分束后S偏振光振幅与P偏振光振幅不相等,经过多个分光棱镜后,S偏振光与P偏振光振幅之差逐步增大,最终引起各路像面的相对照度发生变化,像面一致性变差.

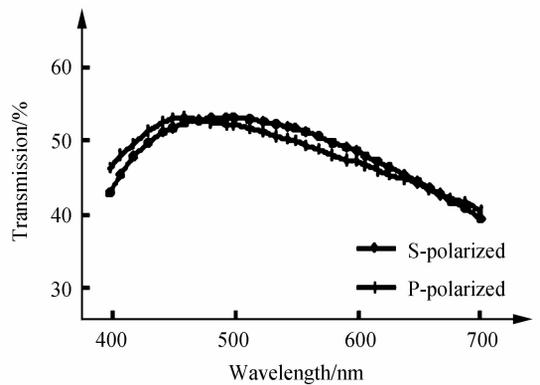


图4 50 : 50 分光棱镜透射率曲线

Fig. 4 50 : 50 cube beam splitter transmission

3 基于光纤匀光作用分幅方法

通过以上分析可知,棱锥分幅方法在物体不是漫反射体时像面一致性变差,棱镜分幅方法在物体的辐射光谱范围变宽时像面一致性变差.为此,提出一种利用光纤传像器件与棱锥相结合提高像面一致性的分幅方法.

3.1 设计原理

在原有棱锥分光的基础上,在物镜与中继镜头之间加入宽光谱工作的光纤传像器件进行传像,利用光纤的多次反射特性实现出射能量的空间对称分布.以光纤面板为例,如图5所示,物镜所成的像由光纤面板进行传像,然后作为中继镜头的物进行二次成像,并由棱锥分幅.目前国内光学分幅式高速相机的物镜 F 数一般大于2,即物镜像方数值孔径(Numerical Aperture, NA)小于0.25,光纤面板数值孔径NA理论值可达到0.55^[13],在满足光瞳衔接原则的情况下,物镜轴外视场成像光束可以有一定角度的偏心,但是较大的偏心会降低能量透过率^[14];而为了保证像面一致性,中继镜头必须使用物方远心镜头.

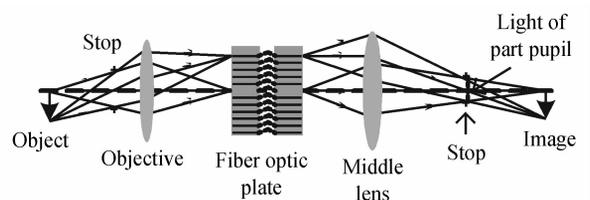


图5 基于光纤面板分幅原理图

Fig. 5 Sketch of beam splitter based on fiber face plate

使用光纤传像器件传像,需要考虑杂散光对像质的影响.对于整个光学系统而言,在物镜一次实像面处加入光纤传像器件,实际上是加入一个视场光阑,有利于消除视场之外的杂散光;而视场之内的杂散光,其入射角一般大于成像光束的入射角,大多大于光纤的数值孔径,因此会被屏蔽,但是也有少部分杂散光会通过光纤传像器件进入中继镜头,影响传像对比度.

另外,如果成像光束边缘光线的入射角度大于光纤传像器件的数值孔径,则会在不同光纤之间发生串扰从而成为杂散光.这一点可以通过孔径匹配设计减小或消除.

光纤本身直径变化、弯曲等缺陷会改变光线传播方向,有利于光纤的匀光作用,光纤光锥由于纤芯直径

的变化会比普通光纤面板更利于实现匀光. 仿真实验以理想的光纤面板为例进行分析, 分析结果同样适用于商用光纤面板及光纤光锥.

3.2 仿真实验

由 3.1 节可知, 光纤面板数值孔径 NA 可大于 0.5, 分幅相机物镜像方数值孔径 NA 小于 0.25, 为使用大孔径物镜且尽量提高光纤面板能量透过率, 以上两个数值均取临界值. 在满足光瞳衔接的前提下, 物镜各视场主光线在光纤面板前端的入射角 α 绝对值须小于 15° . 以下分析影响出射光束能量分布的因素.

首先, 分析光纤面板厚度对光纤出射光束能量旋转对称分布的影响. 在 LightTools 软件中建立光纤模型, 光纤前端添加点光源代替物镜成像点, 点光源发散角 2θ 根据物镜像方数值孔径 NA 设定, 即 $NA = 0.25$, 计算发散角 $2\theta = 29^\circ$; 设置光源光束主光线入射角 $\alpha = 10^\circ$; 分幅相机一般选用 ICCD 接收图像, 常用 ICCD 的极限分辨率不大于 $20 \text{ lp/mm}^{[15]}$, 对应像素尺寸为 $25 \mu\text{m}$, 为使光纤面板分辨率大于 ICCD 分辨率, 设置纤芯直径 $d = 20 \mu\text{m}$. 通过改变厚度 (即单根光纤长度) L 观察出射光束能量的旋转对称性, 目前光纤面板厚度可加工到 1 mm 左右, 所以以 $L = 1 \text{ mm}$ 为起始值, 步长为 1 mm 进行实验; 以六分幅为例, 如图 6 所示, 横坐标是各探测器编号 N_d , 纵坐标是各探测器能量占总能量的百分数 P_E , 当 $L = 1 \text{ mm}$ 时, 各探测器接收到的能量误差较大, 经计算可知, 各幅像面能量偏离六幅像面能量平均值的最大误差为 4% ; 当 $L = 2 \text{ mm}$ 时, 能量分布旋转对称性有较大提高; 当 $L = 4 \text{ mm}$ 时, 六幅像面接收能量误差小于 0.3% , 出射光束能量关于光纤光轴接近理想旋转对称分布. 即随着光纤面板厚度的增加, 各探测器能量误差减小.

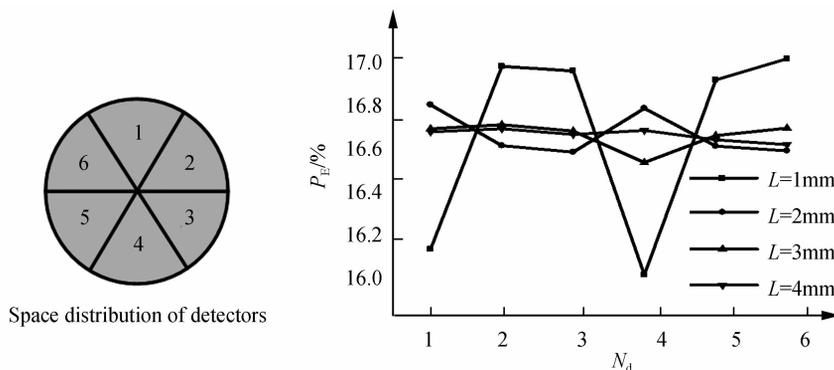


图 6 探测器空间分布及光纤面板厚度不同时六幅像面能量分布情况

Fig. 6 Spatial distribution of detectors and energy distribution in six frames using different thickness of fiber face plate

其次, 分析光纤面板纤芯直径对光纤出射光束能量旋转对称分布的影响. 保持 $\alpha = 10^\circ$ 、 $L = 2 \text{ mm}$ 不变, 改变纤芯直径 d , 分析 d 对出射光束能量分布的影响. 考虑到光纤面板纤芯直径与其对像面分辨率的影响, 分别取 $d = 10 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 和 $25 \mu\text{m}$ 四个数据, 通过实验得各探测器能量分布如图 7, 从图中可以看出随着直径 d 增大, 像面照度差增大.

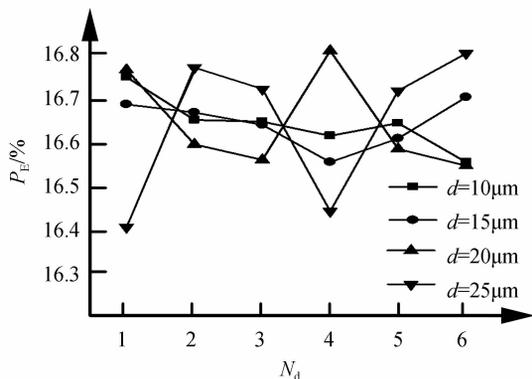


图 7 纤芯直径不同时六幅像面能量分布情况
Fig. 7 Energy distribution in six frames using different core diameter of the fiber

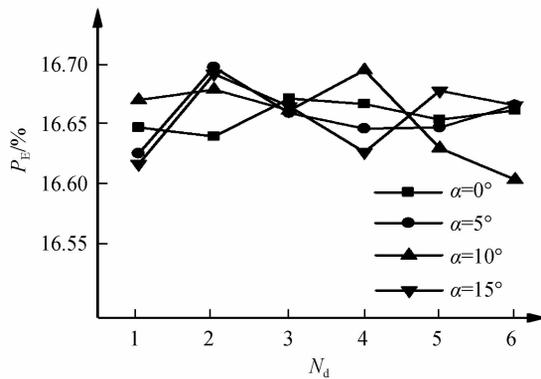


图 8 光线不同入射角度时六幅像面能量分布情况
Fig. 8 Energy distribution in six frames using different incident angle

最后, 分析入射角 α 对出射光束能量旋转对称分布的影响. 已知 α 角应在 -15° 至 15° 之间, 保持 $L =$

2 mm、 $d=20\ \mu\text{m}$ 不变,改变 α 角大小,得到图 8 所示折线图,从图中可知随着 α 角的逐步增大,各探测器能量百分比误差相差不大,经计算知六幅像面能量误差小于 0.3%,即光线入射角度 α 对出射光束能量旋转对称分布的影响较小。

通过仿真实验可知,光纤出射端光束能量旋转对称分布主要受纤芯直径 d 与厚度 L 的影响.将中继镜头设计为物方远心镜头,光纤面板中每根光纤出射端作为中继镜头的物点,即可使得每个物点发出的光线都充满系统的孔径光阑,从而实现均匀分幅.但该方法受光纤芯径和占空比的影响,会造成一定的分辨率损失和能量损失。

4 结论

本文从棱锥、棱镜的分光原理出发,分析了影响分幅相机像面一致性的因素,在棱锥分幅方法中,物体辐射能量的空间分布影响像面一致性;在棱镜分幅方法中,物体辐射光谱范围影响像面一致性.为提高像面一致性,本文提出了一种光纤传像器件与棱锥结合实现分幅的方法,根据 LightTools 软件分析结果可知,该方法拥有很高的像面一致性,减小了物体辐射特性对像面一致性的影响,保证了极限情况下分幅相机的光学性能。

参考文献

- [1] JIANG Xiao-guo, WANG Yuan, JIN Guang, *et al.* Three-frame framing camera with ultrahigh speed and high performance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9):1065-1070.
江孝国,王远,金光,等.超高速高性能门控型三分幅相机[J].光子学报,2013,**42**(9):1065-1070.
- [2] LI Jing-zhen. Time amplifying techniques towards atomic time resolution[J]. *Science China Technological Sciences*, 2009, **39**(12): 1887-1904.
李景镇.迈向原子时间分辨的时间放大技术[J].中国科学 E 辑:技术科学,2009,**39**(12): 1887-1904
- [3] YANG Li-yun, XU Peng, GAO Xiang-tao, *et al.* Digital laser high-speed photography system and its application in photomechanical tests with blast loading[J]. *Science & Technology Review*, 2014, **32**(32):17-21.
杨立云,许鹏,高祥涛,等.数字激光光速摄影系统及其在爆炸光测力学实验中的应用[J].科技导报,2014,**32**(32):17-32.
- [4] LI Jian, LIU Ning-wen, XIAO Zheng-fei, *et al.* Optical system design of ultra high speed optic electronic framing camera used in shlieren experiment[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41**(10): 38-41.
李剑,刘宁文,肖正飞,等.可用于多幅纹影照相的超高速光电分幅相机光学系统设计[J].光电工程,2014,**41**(10):38-41.
- [5] PENDLEY G J. High speed imaging technology: yesterday, today, & tomorrow[C]. SPIE, 2003, **4948**: 110-113.
- [6] 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.
- [7] HONOUR J. A high-resolution sixteen frame ultra fast digital imaging system[C]. SPIE, 2000, **3968**: 4-9.
- [8] XING Lina, XIE Peng. Design and analysis of supporting structure of cubic prism for there-frame in high-speed multi-frame camera[C]. SPIE, 2012, 84201D1-84201D6.
- [9] XIE Hong-bo, ZHU Shi-min, GONG Yan-xia, *et al.* The design of off-axis optical system applied for digital high-speed imaging[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, **36**(2): 194-198.
谢洪波,祝世民,龚艳霞,等.应用于数字高速成像的离轴光学系统设计[J].应用光学,2015,**36**(2):194-198.
- [10] XIE Hong-bo, XU Meng-meng, GONG Yan-xia, *et al.* Optical system design of wide-spectrum and ultra high-speed 8-frame camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, **37**(2): 172-176.
谢洪波,徐萌萌,龚艳霞,等.宽光谱超高速八分幅相机的光学系统设计[J].应用光学,2016,**37**(2):172-176.
- [11] FISCHER R E. Optical system design 2nd[M]. New York: McGraw-Hill,2008.
- [12] SHI Jin-hui, WANG Zheng-ping. Design and characteristics analysis of non-polarizing beam splitters[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2008, **29**(9): 1019-1022.
史金辉,王政平.消偏振分光棱镜的设计与性能分析[J].哈尔滨工程大学学报,2008,**29**(9):1019-1022.
- [13] KONG De-peng, WANG Li-li. A new approach for fabricating imaging fiber, optic fiber plates and taper[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2913-2916.
孔德鹏,王丽莉.传像光纤、光纤面板及光锥制造新方法探索[J].光子学报,2009,**38**(11):2913-2916.
- [14] 张敬贤,高稚允,胡士凌,等. SKC-1 型光纤面板数值孔径测试仪[J]. 仪器仪表学报,1988,**09**(3):316-322.
- [15] PAN Jun-jie, ZHAO Bao-sheng, SAN Xiao-feng *et al.* Analysis on influencing factors of resolution of X-ray image intensifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1116-1118.
潘俊杰,赵宝升,赛小锋.影响 X 射线像增强器分辨率的因素分析[J].光子学报,2008,**37**(6):1116-1118.