

光纤视场合成四维光谱成像仪

李立波^{1,2} 冯玉涛¹ 王 爽¹ 白清兰¹ 胡炳樑¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 作为现代遥感技术最重要的发展之一, 光谱成像仪在军事、地质、海洋、大气探测等各个领域都有着广泛的应用。然而传统的色散或者干涉光谱成像仪由于需要多次曝光来扫描数据立方体, 并不适合于场景快速变换的情况。四维(4D)光纤视场合成光谱成像仪, 一种将特制光纤束置于望远镜的像面并成线性排列输出到光谱仪的技术, 使得光谱成像仪能够通过单次曝光便获取目标的数据立方体, 从而具有观测高速目标和瞬变现象的能力。搭建了一套桌面实验系统, 在可见光谱段获得 4.2 nm 的光谱分辨率, 对彩色目标的成像效果良好。对光纤束排列误差进行了分析, 并给出了校准方法。

关键词 光谱学; 光谱成像仪; 光纤束; 高速目标; 瞬变现象

中图分类号 TH744 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0511004

Four Dimensional Spectral Imager with Integral Field Fiber Bundle

Li Libo^{1,2} Feng Yutao¹ Wang Shuang¹ Bai Qinglan¹ Hu Bingliang^{1,2}

(¹ Xi'an Institute of optics and precision mechanics of CAS, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract As one of the most important development of remote sensing, spectral imager has been widely used in military, geognosy, ocean and atmosphere measurement. However, the classic spectral imager, neither dispersive spectral imager nor Fourier transform spectrometer, which has to take multiple exposures to scan spectral data cube, do not suit with the situation that the scene change too fast. Four-dimensional (4D) fiber reformatting spectral imager, in which a special optical fiber bundle sits in the image plane of the telescope and has linearly aligned at the entrance to the spectrograph, can capture three-dimensional (3D) spectral data cube in a single exposure. So it enable to measure fast moving target or fast changing scene. A breadboard system in the laboratory is described, the average spectral resolution of the system is 4.2 nm in visible range, and a good imaging result of color target is got. The fiber bundle errors are analyzed, and the calibrating method is given.

Key words spectroscopy; spectral imager; fiber bundle; fast moving target; fast changing scene

OCIS codes 110.4234; 120.6200; 300.6550

1 引 言

光谱成像仪采集得到的数据立方体包括两维空间信息和一维光谱信息, 而探测器最多只能采集二维数据, 另外一维数据需要扫描即多次曝光来获得, 因而需要较长的时间才能获取完整的数据立方体^[1-4]。随着光谱成像仪应用的拓展, 适用于探测快速变化目标的各种光谱成像仪被提了出来, 通常称之为快照式光谱成像仪(SIS), 即可以同时获取两

维空间、一维光谱, 如果连续曝光则可得到随时间变换的信息, 因此也被称为四维光谱成像仪(4DIS), 以区别需要扫描的传统光谱成像仪^[5]。

不同于传统的色散型或干涉型光谱成像仪, 4D光谱成像仪单次曝光即可完成光谱数据立方体的采集, 如光纤视场合成光谱成像仪(FRSI)^[6]、计算层析型光谱成像仪(CTIS)^[7]和编码孔径快照光谱成像仪(CASSI)^[8]。它们的共同特点是利用特殊的光学器

收稿日期: 2013-12-23; **收到修改稿日期**: 2014-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(41005019)

作者简介: 李立波(1984—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事光谱成像技术方面的研究。E-mail: lilibo@opt.ac.cn

导师简介: 胡炳樑(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光谱成像技术方面的研究。E-mail: hbl@opt.ac.cn

件对空间光谱信息进行编码,将多维数据变换投影到二维的面阵探测器上,然后对采集数据解算复原,得到光谱数据立方体。相对于 CTIS 和 CASSI,由于 FRSI 只对空间信息进行了重排,其解算复原过程要简单得多,在实时性方面有更大的优势。

光纤视场合成光谱成像仪利用变形光纤束作为像分割器件,将二维场景分割排列成一维,输出到色散光谱仪,在像面处得到的就是二维空间的光谱图。光纤束作为像分割器件早在 1958 年就由 Kapany 提出,但受到技术的限制,始终无法制造出达到工程使用要求的光纤束产品,直到上世纪八九十年代,随着制造水平的提高,该项技术才逐渐得到应用,并在八十年代初应用在了天文观测领域。1982 年,英澳天文台的 Gray 等研制了光纤视场合成光谱成像仪的原型样机,使用了 100 根纤芯直径为 $200\ \mu\text{m}$ 的石英光纤,与 $3.9\ \text{m}$ 口径的英澳望远镜对接,可实现 $17''\times 22''$ 的视场区域覆盖。1988 年,法国巴黎-默东天文台的 Vanderriest 等^[9] 研制了光纤线性转换成像 (SILFID) 光谱仪,用在 CFH 望远镜上,所使用的光纤的纤芯直径为 $100\ \mu\text{m}$,光纤束所包含的光纤数量达到 397 根。1998 年,德国 Tecza 等^[10] 研制了红外光纤视场成像 (SPIFFI) 光谱仪,所使用的光纤束包含 1024 根石英光纤,纤芯直径减小到 $50\ \mu\text{m}$,工作波段也扩展到 $1100\sim 2500\ \text{nm}$ 的近红外,可与 $4\sim 8\ \text{m}$ 的天文望远镜进行对接。2006 年美国 OKSI 公司的 Gat 等^[11] 研制了 4DIS,包括 $400\sim 1000\ \text{nm}$ 的可见近红外波段和 MWIR 的中波红外波段,该设备用于火箭发动机尾焰、气体电离发光等瞬变现象的观测。

从以上的发展可以看出,光纤视场合成光谱成像仪对于弱目标和瞬变现象的凝视观测中有着重要的应用,并且随着技术水平的发展,光纤束的纤芯直径不断减小,集成度越来越高,其工作波段也由最初的可见光扩展到红外波段。本文介绍了该类型光谱成像仪的工作原理,在实验室搭建了桌面系统,对光纤束的误差进行了分析。

2 技术原理

光纤具有良好的透光性,一根光纤可传递一个像素,如果将大量光纤以一定方式排列、胶合或熔压成光纤束,经端面研磨、抛光即可获得具有各种用途的光纤元件。另外光纤比较柔软、可弯曲,将光纤的两个端面排列成不同形状,则可以做成光纤转换器,达到传光或者传像的目的^[12-13]。如果将光纤一端排列成面阵,另一端排列成线阵,那么就可以将二维

图像转换成一维进行扫描,从而使很多问题得到简化。4D 光纤视场合成光谱成像仪正是利用了这种特殊的传像光纤束,实现了二维视场的分割重排,解决了三维数据同时采集的难题。

4D 光纤视场合成光谱成像仪的工作原理如图 1 所示,光纤束矩形端面位于前置望远镜的像面处,线形端面位于色散光谱仪的入射端,相当于光谱仪的入射狭缝,则在光谱仪的像面处得到的就是垂直狭缝方向色散开来的空间光谱信息,然后按照光纤束的变换关系再将采集数据重排,可得到目标的光谱数据立方体。图中的光栅是色散元件,也可以使用棱镜,另外中继镜组是为匹配光谱仪和光纤束的视场及相对孔径,并不是必须的部件。显然,目标场景的数据立方体只需要单次曝光即能获取,具有时间分辨率高、光谱分辨率高、空间分辨率高的特点,对于高速目标和瞬变现象能很好的观测。

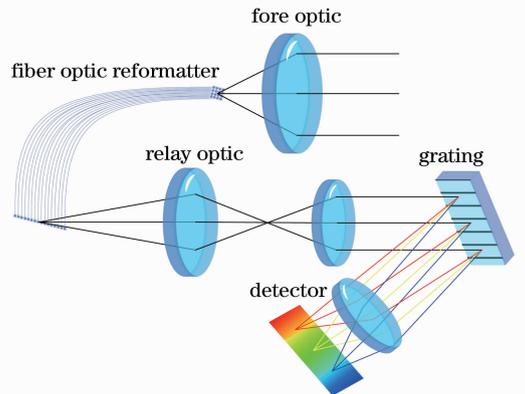


图 1 4D 光纤视场合成光谱成像仪

Fig. 1 Four dimensional (4D) fiber-reformatting imaging spectrometry

3 桌面实验系统

视场合成光纤束是系统的关键器件,由于光纤束为异型排列,无法采用传统的集束工艺制作,只能手工进行排列,制作效率低、且容易发生光纤断裂,这也是目前制约该技术发展的重要因素。定制光纤束是由纤芯直径为 $40\ \mu\text{m}$ 的石英光纤排列而成,在可见光到近红外波段具有良好的透射率。光纤的入射端为 $32\ \text{pixel}\times 32\ \text{pixel}$ 的面端,出射端顺序展开成 $1024\ \text{pixel}\times 1\ \text{pixel}$ 的线端,光纤总长度 $0.58\ \text{m}$,排列间距为 $52\ \mu\text{m}$,外部采用金属包裹以保护光纤,并使其可以进行一定程度的弯曲。图 2(a) 给出了光纤束的实物图,图 2(b) 和 (c) 分别是面端和线端的显微图像。

根据工作原理,搭建了桌面实验系统如图 3 所

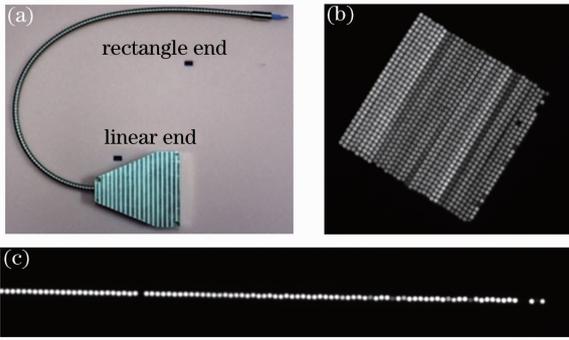


图2 视场合成光纤束。(a)光纤束；(b)面端图像；(c)线端图像

Fig. 2 Integral field fiber bundle. (a) Fiber bundle; (b) image of square end; (c) image of linear end

示。前置镜使用 200 mm 的照相机镜头用于将目标成像于光纤束的入射面端，出射线端则位于放大率为 $0.5\times$ 的远心中继镜组的物面上，并使中继镜组的像面与准直镜物面重合，中继镜组将线视场缩小了一倍，从而更好的匹配探测器。实验中光纤束的端面垂直于光轴，以提高耦合效率，减少能量损失。色散元件采用 Newport 公司的 50 l/mm 的闪耀光栅，闪耀角为 0.86° ，在 600 nm 的峰值衍射效率为 75%，在工作波段 450~850 nm 平均衍射效率约为 60%，具有相当高的能量利用率。探测器为 Vieworks 公司的 VH-4MG，其大小为 $7.4\ \mu\text{m}$ ，面阵大小为 $2048\ \text{pixel}\times 2048\ \text{pixel}$ ，光纤束的一个端元成像于像面处约占 3 pixel，这样 2048 pixel 最大可采集 682 个光纤束端元，考虑预留像元以确定排列起始位置，最终可采集的面阵大小为 $32\ \text{pixel}\times 21\ \text{pixel}$ 。

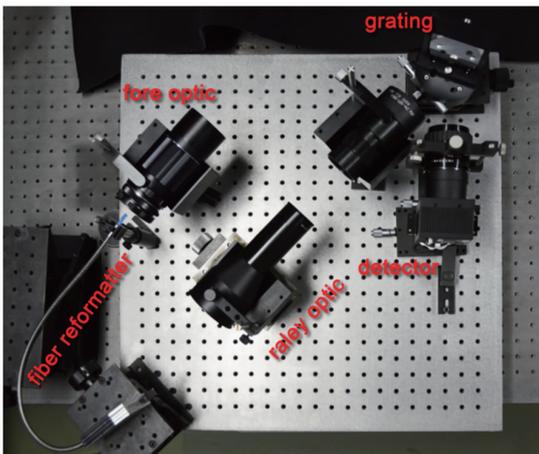


图3 实验室桌面系统

Fig. 3 Breadboard system in the laboratory

光栅具有很高的色散本领，光谱分辨率主要受限于光纤直径和探测器像素尺寸的限制，实验中光纤直径大于探测器像素尺寸为光谱分辨率决定因

素。理论的光谱分辨率约为 3.68 nm。探测器的尺寸要小于光纤的纤芯直径，因此光谱采样宽度小于系统的光谱分辨率，实验中的光谱采样宽度为 1.6 nm。空间分辨率由前置镜焦距和光纤端元尺寸决定，更换长焦距的前置镜可以获得更高的分辨率，反之使用短焦距的前置镜分辨率将降低，对于 200 mm 焦距的前置镜其理论分辨率为 $0.9'$ 。桌面系统的指标参数如表 1 所示。

表1 桌面系统指标参数

Table 1 Specification of breadboard system

Parameter	Value
Spectral range /nm	450~850
Spectral resolution /nm	3.68
Spectralwidth sampling /nm	1.6
Pixel	31×21

4 成像实验及结果

在采集数据前，先使用高压汞灯作为光源进行光谱的定标，高压汞灯在 200~700 nm 的波长范围内具有分布均匀的线光谱，适用于各类紫外到可见光波段光谱仪器的波长校准测试。利用已知谱线波长，和探测器响应的局部极值位置，选择最小二乘拟合出关于波长 λ 关于位置 x 的二次方程，完成光谱定标^[14]。

实验数据与定标结果如表 2 所示，表中给出了像素位置数据、特征波长、拟合波长、拟合波长偏差。由于光谱分辨率不够，高压汞灯两条较为接近的谱线 576.96 nm 和 579.07 nm 合为一条谱线，因此以两谱线的平均波长 578.02 nm 做为标定波长。拟合后的波长最大偏差为 0.35 nm。

由于谱线轮廓的差异、光学系统的像差，光源的不稳定性和仪器装调等方面的误差，光谱仪器的实

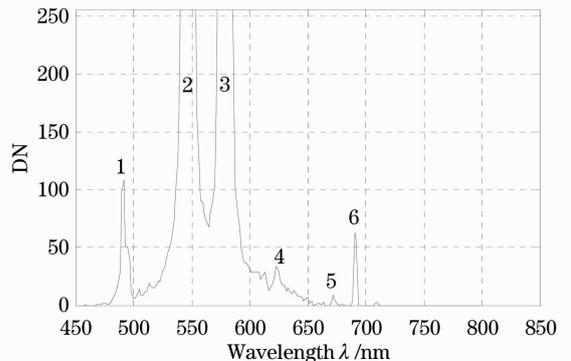


图4 定标后的高压汞灯光谱曲线

Fig. 4 Spectrum of high-pressure mercury lamp after calibrated

际光谱分辨力总比理论计算结果差。对实测高压汞灯谱线进行线形插值,测量得到 546.1 nm 谱线的

半峰全宽为 4.2 nm,略大于 3.68 nm 的理论值。

表 2 高压汞灯光谱定标谱线

Table 2 Spectral calibration by high-pressure mercury lamp

Sampling point	1	2	3	4	5	6
Pixel position	50	83	102	129	158	169
Theoretical wavelength /nm	491.6	546.07	578.02*	623.44	671.62	690.72
Fitted wavelength /nm	491.52	546.29	577.97	623.17	671.97	690.54
Error /nm	-0.07	0.22	-0.05	-0.27	0.35	-0.18

* The emission spectrum of high-pressure mercury lamp at 576.96 nm and 579.07 nm is too close to be apart, only average wavelength is considered.

对复杂彩色目标图 5(a)成像,结果如图 5(b)所示,该图是由 658.5,566.3,483.3 nm 三个谱段的数据做为 RGB 三原色合成的彩色图,与人眼视觉感官色彩基本一致,但是图像在 X 方向存在明显错位

和几何变形。图 6 中则给出了像素坐标为(13,6)、(24,6),(29,6),(27,13)四个点的光谱曲线,分别对应红色、绿色、黄色和蓝绿色四种颜色,曲线很好的反映了不同颜色的光谱区别。

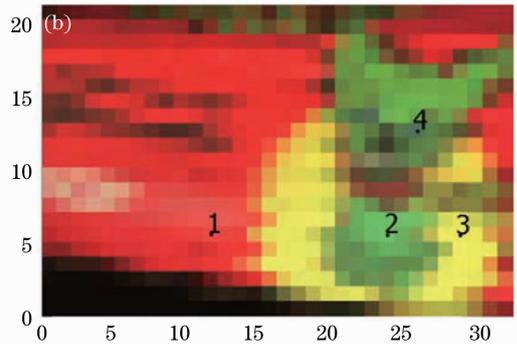


图 5 目标及成像结果。(a)彩色目标;(b)实验结果

Fig. 5 Experiment result of color target. (a) Color target; (b) experiment result

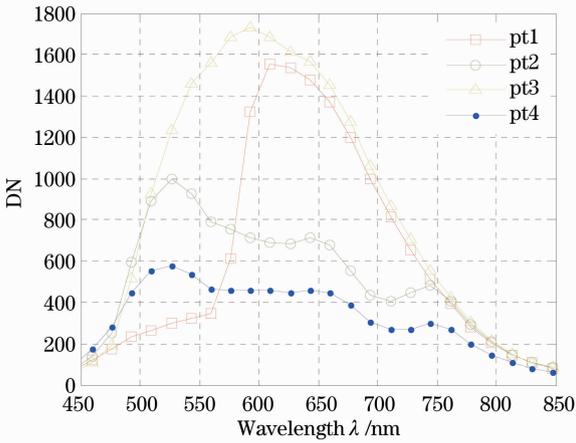


图 6 不同位置的光谱曲线

Fig. 6 Spectrum of different pixel

5 光纤束排列误差

对于光纤视场合成光谱成像仪,由于使用了光纤束这种空间采样器件,给系统带来了新的问题:光纤排列存在位置和倾斜两种误差,这两种误差对成

像性能都有较大的影响,需要在制造过程中需要特别注意。

其中面端排列的位置误差影响空间采样位置,使图像错位,而线端排列的位置误差,除了使探测器采集得到的谱线“疏密”不同,还会引起光谱位置的变化,因此每根光纤的光谱曲线都需要进行光谱标定,以校准光谱,然后每根光纤的都需要空间位置的标定,对数据进行重采样,消除排列位置误差对数据采集的影响。对于空间位置的标定,一种可行的方法是选择小于光纤纤芯直径的点光源作为目标,精确移动点光源,记录其位置和探测器的响应,建立两者空间变换关系,完成空间图像的校准。另外纤芯之间有包裹层和胶层存在一定的间隙,探测器采集得到的图像也会存在间隙,通过插值处理可以提高图像的可视性,提高校准精度。Barden 等^[10]给出一种插值处理方法,对于数据的后处理有很大的借鉴意义。

倾斜误差是由于光纤光轴与端面存在夹角,导

致光束的出射角度不同,影响了透镜组与光纤的耦合效率,不同光纤出射光的亮度存在较大差异,适当增大透镜组的数值孔径或者采用微透镜进行耦合,有助于减少倾斜误差造成的影响,然后通过辐射度的标定获得均一的响应输出。

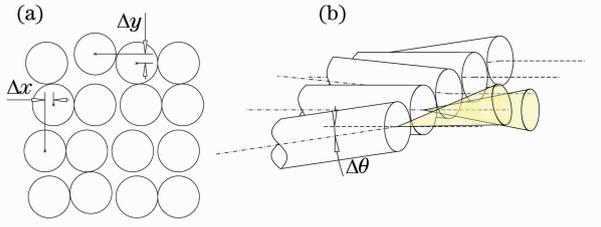


图7 光纤束排列误差。(a)位置误差;(b)倾斜误差

Fig. 7 Main error of fiber bundle. (a) Alignment error; (b) tilt error

6 结 论

光纤视场合成光谱成像仪没有运动部件,时间分辨率高,光谱分辨率高、数据处理简单,特别适合高速物体和瞬变现象的观测,如高速运动的导弹、飞机、人造卫星,记录发动机尾焰、物体爆炸等现象,在军事和空间目标监视领域有着广泛的应用前景。搭建了桌面系统,实验中所使用的光纤束,纤芯直径和集成度都达到了国际先进的水平,系统的性能指标优异,其光谱范围为450~850 nm,成像分辨率32 pixel×21 pixel,光谱分辨率达到了4.2 nm,定标后光谱误差最大0.35 nm。实验中对复杂彩色目标的成像效果良好,对光纤束排列误差的主要影响进行讨论,并给出了校准方法。

参 考 文 献

- 1 Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(1): 18-22.
相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. 光学学报, 1998, 18(1): 18-22.
- 2 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Study on limb imaging spectrometer with grating dispersion [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1517-1521.
薛庆生, 王淑荣, 李福田. 光栅色散临边成像光谱仪的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1517-1521.

- 3 Wang Hong, Liu Xuebin, Feng Yutao, *et al.*. A new reduction technique for thermospheric wind and temperature measurement with Fabry-Perot interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1130003.
王 宏, 刘学斌, 冯玉涛, 等. 基于法布里珀罗干涉仪反演大气风速和温度的简化算法[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1130003.
- 4 Li Zhanfeng, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Research on high-accuracy in-flight spectral calibration of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228002.
李占峰, 王淑荣, 黄 煜, 等. 紫外臭氧垂直探测仪高精度在轨光谱定标方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228002.
- 5 Nathan Hagen, Robert T Kester, Liang Gao, *et al.*. Snapshot advantage: a review of the light collection improvement for parallel high-dimensional measurement systems [J]. Opt Eng, 2012, 51(11): 111702.
- 6 D J Mansur, J R Dupuis, R Vaillancourt. Fiber optic snapshot hyperspectral imager [C]. SPIE, 2012, 8360: 836007.
- 7 M Descour, E Dereniak. Computed-tomography imaging spectrometer: experimental calibration and reconstruction results [J]. Appl Opt, 1995, 34(22): 4817-4826.
- 8 M E Gehm, R John, D J Brady, *et al.*. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture [J]. Opt Express, 2007, 15(21): 14013-14027.
- 9 C Vanderriest, J P Lemonnier. Instrumentation in astronomy [C]. Proceedings of IXth Santa Cruz Workshop, 1988, 304.
- 10 M Tecza, N Thatte, *et al.*. SPIFFI: a high-resolution near-infrared imaging spectrometer [C]. SPIE, 1998, 3354: 394-403.
- 11 Nahum Gat, Gordon Scriven, John Garman, *et al.*. Development of four-dimensional imaging spectrometers (4D-IS) [C]. SPIE, 2006, 6302: 63020M.
- 12 Zhu Xiang, Fang Zhonghua, Sun Shengli. Fiber bundle coupling technique in optics system [J]. Infrared Technology, 2006, 28(5): 257-260.
朱 翔, 方中华, 孙胜利. 光纤传像系统中的耦合技术研究[J]. 红外技术, 2006, 28(5): 257-260.
- 13 Cheng Xin. The Study on Optical System of Imaging Fiber-Optic Spectrometer With Wide Field-of View [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of CAS, 2012. 66-69.
程 欣. 大视场光纤成像光谱仪光学系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012. 66-69.
- 14 Wu Yan, Tang Yi, Ni Guoqiang, *et al.*. FUV imaging spectrometer based on crossed Czerny-Turner structure [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(3): 125-129.
吴 雁, 唐 义, 倪国强, 等. 一种交叉的切尔尼-特纳型远紫外成像光谱仪[J]. 光电工程, 2009, 36(3): 125-129.

栏目编辑: 张浩佳