

•光学设计•

基于声光可调谐滤光器的成像光谱仪系统设计

朱海波, 关松

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要:提出了基于声光可调谐滤光器(AOTF)的成像光谱仪系统设计方法,并研制了成像光谱仪原理样机,工作波段为0.45~0.95 μm 。该原理样机的光学系统包括三个部分,放大倍率为6的前置望远系统,AOTF组件和焦距为70 mm的成像系统,原理样机系统焦距为420 mm,取+1级衍射光成像。进行了目标成像试验,给出了天空、楼房(远、近)、树叶、窗户等目标采样点的图像-光谱信息,其中近处楼房和远处楼房具有相同的光谱特性。结果表明,该成像光谱仪可以给出目标的大小、形状、相对位置等空间信息,也可在图像的任何位置上得到一个像元的光谱特性,且同一目标的光谱信息不会因为距离的不同而发生改变。因此可根据不同的光谱信息分辨出目标类型,对目标识别具有实用价值。

关键词:声光可调谐滤光器(AOTF);成像光谱仪;光学设计

中图分类号:TN65;TH744

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-06-0020-04

Design of Imaging Spectrometer Based on AOTF

ZHU Hai-bo, GUAN Song

(Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

Abstract: Based on the theory of acousto-optic tunable filter (AOTF), the design method of the imaging spectrometer is presented and the prototype of the imaging spectrometer is produced with the band from 0.45 μm to 0.95 μm . The prototype is consisted of three parts, which are the fore-telescope system with 6 \times , AOTF components and the imaging lens with the focus of 70 mm. The focus of the prototype system is 420 mm, which collects +1 diffraction order. The target imaging experiments are performed to provide the image and spectrum information of target sampling points such as the sky, near and far buildings, trees and windows, in which the near building and the far building have the same spectrum characteristics. Experimental results show that the prototype can provide not only the space information of the target such as size, shape and relative position, but also obtains the spectrum characteristics of a pixel of the image. The same target has the same spectrum information which is not related to the detection distance. So the kind of the targets can be recognized according to different spectrum information, which has practice value to target recognition.

Key words: acousto-optic tunable filter (AOTF); imaging spectrometer; optical design

基于声光可调谐滤光器(AOTF)的成像光谱技术是随着高光谱技术发展起来的新型技术,得到了国内外学者的广泛关注,成为各领域研究的热点,并取得了丰硕的研究成果。随着多光谱技术的发展和AOTF光谱分辨率的提升^[1],AOTF成像光谱仪

的应用前景更加广阔,从农业、生物医学到军事侦察,根据不同需求设计出应用于不同领域的AOTF成像光谱仪是未来的发展趋势。基于AOTF的成像光谱仪在土地资源利用、林业、生态和农业应用等方面也表现出其优越性^[2-3],还可用于食品工业、烟

草、化工、生物医药等传统产业用于实现产品差分的非破坏检测和在线分析等^[4-7]。美国国家航空航天局NASA研制的AIMS^[8]和欧洲航天局ESA研制的SPICAM^[9]等AOTF成像光谱载荷均已用于他们各自的火星探测任务。北京航空航天大学也研制了基于AOTF的成像光谱仪原理样机,应用于火星探测^[10];中国科学院西安光学精密机械研究所对AOTF特性进行了深入的剖析,并研制出成像光谱仪^[11-12]。

研制成像光谱仪的关键技术在于光学系统设计、光阑位置设置、工作距离设计等。其中光学系统影响分辨率;光阑位置影响视场角,工作距离影响成像光谱分离效果。文中基于AOTF成像光谱仪设计中的若干关键问题进行了系统设计与研究,光谱范围为可见光-近红外波段。利用AOTF的成像光谱仪原理样机,开展了图像识别实验,对天空、楼房(远、近)、树叶、窗户等目标采样点的图像-光谱信息,分析获取了各个目标的大小、形状、相对位置等空间信息。

1 AOTF工作原理

声光可调谐滤波器(AOTF)是一种光电调制器件,利用声波与光波在声光介质中的相互作用原理进行工作^[13-16]。

AOTF是由三部分组成,即声光介质、换能器阵列和吸声体。当射频信号加到换能器上时,激励出声波并耦合到声光介质。为了防止声波反射,透过介质的声波被吸声体吸收。当复色光以特定的角度入射到声光介质后,经过声光相互作用,对应某个声频率,入射光被超声波衍射成两束正交偏振的单色光,一束为e光,一束为o光,分别位于零级光两侧。当改变声波频率时,满足动量匹配条件的衍射光波长也将相应改变,连续改变超声频率就能实现衍射光波长的快速扫描。

1974年,I C Chang提出了非共线声光可调谐滤波器的设计思想,为声光器件的发展奠定了坚实的基础^[17-18]。非共线AOTF使入射光线和衍射光线在波矢轨迹上的切面保持互相平行,因而当入射角有一个小的改变时,仍能保持动量匹配条件成立,从而具有大的角孔径。图1为非共线AOTF声光相互作用的波矢图。

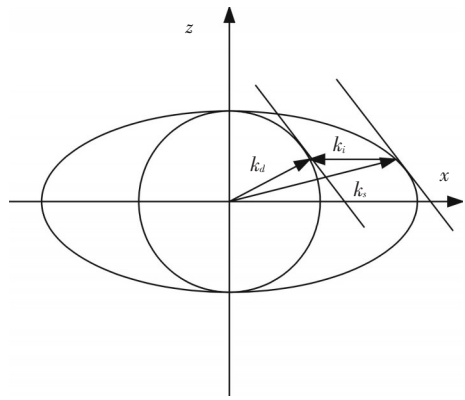


图1 非共线声光相互作用波矢图

2 系统设计分析

2.1 AOTF成像光谱仪系统组成

AOTF成像光谱仪主要由光机系统和电子学系统组成,其中光机系统包括前置光学系统、AOTF及其控制器、成像光学系统和探测器;电子学系统包括主控计算机、电路板和可控射频信号源,可以控制AOTF的时序,进行数据采集和视频处理。光线经前置光学系统准直后进入AOTF,经过AOTF分光后进入成像系统并在探测器上成像。AOTF是该系统的分光元件,其输出波长取决于驱动电路产生的射频信号频率,通过采集不同波长处的目标,即得到目标的成像光谱信息。这样就构成了以物空间平面二维和波长为坐标的数据立方体,实现了图谱合一。

2.2 光阑位置设计

对于AOTF成像光谱仪光学系统,声光器件的工作原理限制了光束成像,需要根据成像光谱仪的技术指标确定探测器类型,并合理设计光学系统方案,确定物象关系和基本光学特性,如焦距、视场、相对孔径及光阑位置等,合理布局并分配设计参数。

在光学系统设计时,将晶体等效为平板,进行焦距、视场、相对孔径等参数的计算,但由于声光可调谐滤波器中采用的声光晶体工作原理的特殊性,对于视场光阑和孔径光阑的布局需综合考虑,光阑布局不同,进入晶体的光束情况也不同。文献[12]

对孔径光阑和视场光阑的位置进行了详细的分析,文中借鉴了该分析,将孔径光阑放置在晶体上。

孔径光阑位于晶体上(如图2)。

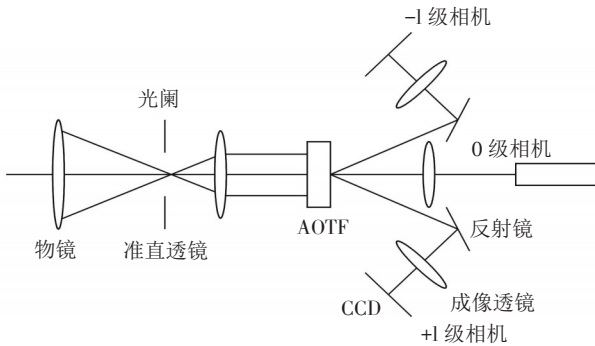


图2 孔径光阑位于晶体上

进入晶体的光束都是平行光,视场光阑就位于前置光学望远镜的一次像面上。为保证入射到晶体上的光束满足孔径角的要求,同时要保证衍射光束和入射光束的空间分离,设计要求前置望远系统的光束发散角要小于晶体可接收的立体角,可见晶体可接收的角度限制了系统的视场角。

2.3 光学系统参数设计

将孔径光阑放置在晶体上,光学系统包括由前置望远系统、AOTF组件和成像系统组成。光束经前置望远系统准直后进入AOTF,经AOTF调谐后产生零级衍射光和 ± 1 级偏振态正交的o光和e衍射光,系统只使用+1级衍射光。

AOTF器件的光谱范围 $0.45\sim 0.95\ \mu\text{m}$,工作频率 $70\sim 182\ \text{MHz}$,通光孔径 $8\times 8\ \text{mm}$,衍射效率 $\geq 60\%$,分离角 $\geq 5.6^\circ$,光谱分辨率 $1\sim 10\ \text{nm}$,接收孔径角 $5.9^\circ\sim 8^\circ$ 。

AOTF的接收孔径角为 $5.9^\circ\sim 8^\circ$,既要保证入射到晶体上的光束满足角孔径要求,又要保证衍射光束和入射光束的空间分离,设计要求前置望远系统的光束发散角小于 3° 。根据系统的总体技术指标,综合考虑前置望远系统和成像镜系统的像差匹配,选择前置望远系统为6倍扩束,口径为 $\Phi 48\ \text{mm}$,视场角为 1° ,成像系统焦距取为 $70\ \text{mm}$,则整个成像光谱仪系统焦距为 $420\ \text{mm}$ 。

2.4 系统工作距离设计

系统的工作距离是AOTF到成像光学系统第一面

的距离 L 。AOTF的通光口径为正方形($8\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}$),因为入射光束为平行光束,衍射光斑 $ABCD$ 为正方形,透射光斑 $A'B'C'D'$ 也为正方形。衍射光束和透射光束的夹角为 5.6° ,衍射光的方向基本与光轴方向保持平行,透射光则偏离水平方向向下。在工作距离比较小时,透射光斑和衍射光斑有相互重叠。只有当工作距离足够大时,两个光斑才能分离。如图3所示。为了分别检测到AOTF的透射光和衍射光,必须确定系统的最小工作距离 L_{\min} 。

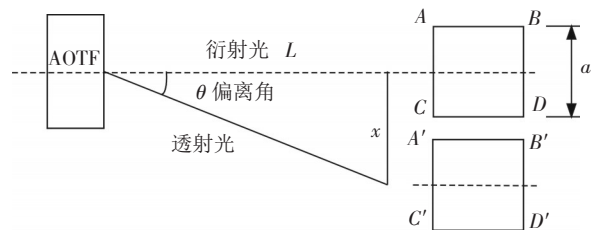


图3 AOTF工作距离示意图

设衍射光斑和透射光斑的中心距离为 x ,光斑宽度为 a ,当 $x=a$ 时,两光斑刚好分离。这时成像光学系统的第一个面与AOTF之间的距离为最小工作距离 L_{\min} ,即

$$L_{\min} = a / \tan \theta_{\text{偏离角}} \quad (1)$$

系统中 $a=8\ \text{mm}$, $\theta_{\text{偏离角}}=5.6^\circ$,则 $L_{\min}=81.59\ \text{mm}$,在光学设计时可取为 $100\ \text{mm}$ 。

2.5 光谱仪光学系统设计结果

根据上述分析,针对AOTF器件的特殊性,初步设计了基于AOTF器件的可见光/近红外光谱仪的光学系统,将孔径光阑设置在AOTF器件上,AOTF前置系统为无焦望远系统,进出AOTF的光束均为平行光,后置光学系统为成像系统。

通过光学设计软件ZEMAX对 TeO_2 晶体进行光栅模拟,并对 $0.45\sim 0.95\ \mu\text{m}$ 的波段进行消色差设计,采用了FK类玻璃和ZF玻璃,得到如图4所示的光学系统。光学系统在 $32\ \text{lp/mm}$ 的空间频率下MTF达到0.7以上,如图5所示。

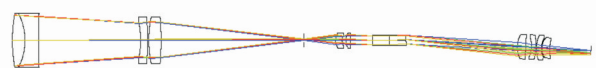


图4 AOTF成像光谱仪光学系统图

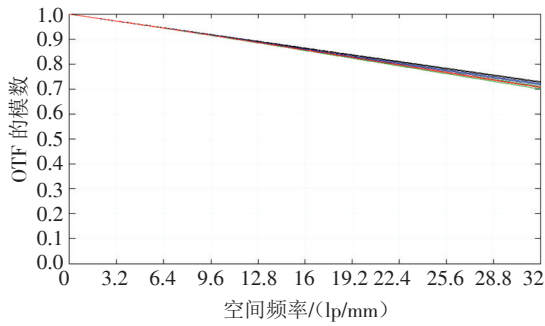


图5 MTF 曲线图

2.6 试验及结果分析

成像光谱仪能够同时获得目标的空间几何特征信息和反映物质属性与材料的光谱特征信息,这些信息具有光谱紧密并连续、光谱分辨率高、波段多、图谱合一等特征,如景物的大小、形状、相对位置等空间信息,也可以在图像中任何位置上得到一个像元的光谱特性,通过分析获得该像元对应景物的类型或成分的信息。

采用自行设计的 AOTF 成像光谱仪对目标成像,可采集到不同波长的图像信息,如图6所示。

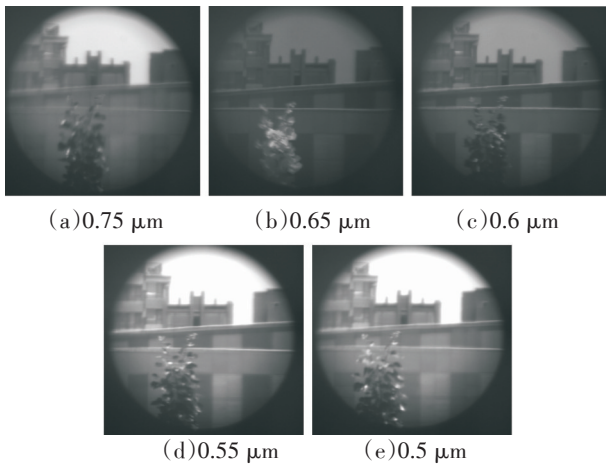


图6 光谱图像

对5幅图像中的不同部位进行采样(如图7)。

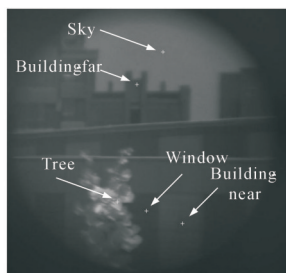


图7 图像采样点位置

获取同一采样点的光谱图(如图8)。采样点包括:天空、楼房(远处)、树叶、窗户(近处)、楼房(近处)。

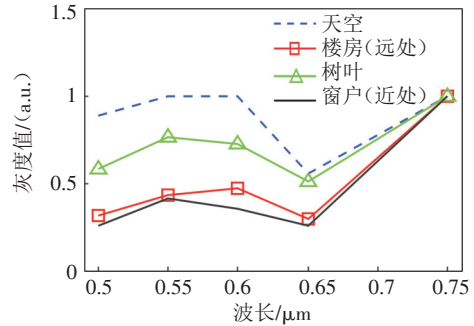


图8 采样点光谱图

由图可见,5个采样点给出了4条光谱曲线,其中近处楼房和远处楼房具有相同的光谱特性,说明同一目标的光谱信息不会因为距离的不同而发生改变。不同的目标具有不同的光谱特性,可以根据试验测得的光谱信息判别目标的类型。图中不同波长处目标成像的清晰度不同,原因在于AOTF在不同波长处的衍射效率不同,导致各目标点的灰度值不同。

3 结 论

研制了一种基于 AOTF 的成像光谱仪,对其进行了光学设计,优化了光阑位置、系统参数和工作距离,光谱范围为 0.45~0.95 μm。应用该成像光谱仪进行了目标成像试验,并给出了天空、楼房(远、近)、树叶、窗户等目标采样点的图像-光谱信息。结果表明,该成像光谱仪可以给出目标的大小、形状、相对位置等空间信息,也可在图像的任何位置上得到一个像元的光谱特性信息,可根据不同的光谱信息分辨出目标类型,对目标识别具有实用价值。

参考文献

[1] 苏歌,徐睿,王建宇.AOTF测量光谱分辨率提升算法的仿真[J]. 红外,2016,37(10):23-29,47.
 [2] Delwiche S R, Kim M S. Hyper spectral imaging detection of scab in wheat[J]. SPIE, 2000, 4203:13-20.
 [3] LIU Ji-fan, MA Yan-hu, ZHANG Lei, et al. An AOTF hy-

(下转第70页)

190 mm, 厚度 5 mm 以 K9 玻璃球罩为例, 计算了 532 nm 和 1 064 nm 两种波段激光在光学玻璃球罩中的传播特性, 分析了双波段激光的指向误差。当激光在球罩中扫描时, 会出现轴向误差, 不同波段激光出现传播方向分离。这种轴向误差在总体设计中需要考虑补偿。文中的分析为光电系统设计提供了有意义的参考。

参考文献

- [1] David H Titterton. A consideration of the requirements for laser devices used in countermeasure[J]. Proc of SPIE, 2007, 6451: 64511Q.
- [2] 李文魁, 工俊璞, 金志华, 等. 直升机机载光电吊舱的发展现状及对策[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(5): 75-80.

- [3] 陈苗海. 机载光电导航瞄准系统的应用和发展概况[J]. 电光与控制, 2003, 10(4): 42-47.
- [4] 孙洪拓, 徐锦, 王长青, 等. 定向红外干扰技术的现状与发展趋势[J]. 船舶电子工程, 2006, 26(4): 13-18.
- [5] 郭汝海, 赵新宇, 马军. 光电对抗用激光器技术[J]. 光机电信息, 2011, 28(11): 1-7.
- [6] 许德, 章学堤, 林思文, 等. 光学球罩水波纹产生的原因及改善方案[J]. 工艺与装备, 2016, 2: 21-24.
- [7] 韩松伟, 项阳, 刘洵, 等. 机载光电平台球罩的视轴指向误差[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2386-2392.
- [8] 杜少军, 陆启生, 赵伊君, 等. 激光窗口形状对应力和光束位相影响的数值计算[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(3): 273-275.
- [9] 杜少军, 陆启生, 舒柏宏. 球壳激光窗口附加相移的分析和计算[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 681-684.
- [10] 李海波, 车驰骋. 光电设备中球罩的视轴误差研究[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(6): 75-78.

(上接第23页)

perspectival imager: the multi-scale remote sensing of Tibetan Plateau[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(1): 86-90.

- [4] Barocsi Attila. Investigation of acousto-optic tunable filter parameters for fast spectrometer application[J]. Optical Engineering, 1993, 32(10): 2569-2573.
- [5] 杨丽, 李菁, 刘翠红, 等. AOTF 近红外光谱技术在淫羊藿浓缩过程在线检测中的应用[J]. 中国医药导报, 2014(24): 111-114.
- [6] 胡浩武, 耿昭, 王木兰, 等. AOTF-近红外光谱技术在浓缩六味地黄丸提取浓缩过程理化指标快速分析中的应用研究[J]. 时珍国医国药, 2012, 23(2): 398-400.
- [7] 刘子毓, 侯玉文, 许强, 等. AOTF 近红外光谱技术及在食安领域的应用[J]. 光电技术应用, 2012, 27(1): 25-28.
- [8] David A G, Diana L B, John J H. AIMS: acousto-optic imaging spectrometer for spectral mapping of solid surface[J]. Acta Astronautica, 2003, 52: 389-396.
- [9] Korablev O, Bertaux J L, Dimarllis E, et al. An AOTF-based spectrometer for mars atmosphere sounding [J]. SPIE, 2002, 4818: 261-271.
- [10] 赵慧洁, 程宣, 张颖. 用于火星探测的声光可调谐滤波器

成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 945-1951.

- [11] 常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. AOTF 成像光谱仪光机系统设计[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 45-349.
- [12] 常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. AOTF 成像光谱仪光学系统的最优方案选择[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 5-8.
- [13] 徐介平. 声光器件的原理设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 12.
- [14] 毛谦敏, 袁雷, 余桂英, 等. 基于 AOTF 技术红外单色光调谐控制系统的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3): 236-240.
- [15] 何梓健, 时家明, 汪家春, 等. AOTF 高光谱探测系统对伪装目标的识别研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(7): 796-800.
- [16] 常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. 声光可调谐滤波器(AOTF)消色散设计[J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2895-2899.
- [17] Chang I C. Phosphorescence imaging system using an acousto-optic filter-based charge coupled device[J]. SPIE, 1997, 351: 229-239.
- [18] 任玉, 红星, 见瑶, 等. 声光调制光谱相机的成像漂移[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 79-186.