

基于 Mach-Zehnder 的像面相交干涉成像光谱技术

肖相国^{1,2}, 张栓民¹, 陈秀萍¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘要: 像面相交干涉光谱成像技术是一种紧凑型光谱成像技术, 具有体积小、质量轻等特点, 可搭载在小卫星或飞机平台上进行光电侦察等工作。研究了像面干涉光谱成像技术, 提出基于多棱镜组合的 Mach-Zehnder 角剪切分束器的设计方案, 对该分束器的工作原理及设计方法进行详细论述, 并结合实例对某光谱分辨率条件下的 Mach-Zehnder 角剪切分束器的角剪切量进行了分析设计。同时研究了像面相交干涉光谱成像系统物镜设计特点, 对该像面相交干涉光谱成像技术进行实验验证。

关键词: 干涉光谱成像; 傅里叶变换; 角剪切分束器; 像面相交干涉

中图分类号: TH744; O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0524001

Image plane intersection interference imaging spectrometer based on Mach-Zehnder

Xiao Xiangguo^{1,2}, Zhang Shuanmin¹, Chen Xiuping¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Image plane intersection interference imaging spectroscopy is a kind of compact imaging spectrometer technology, which has characteristics of small volume and light weight, and is used for small satellite remote sensing mission or airborne photoelectric reconnaissance. Image plane intersection interference imaging spectroscopy was studied. The design scheme of angle shear beam splitter was given based on Mach-Zehnder composed of prisms. Work principle and design method were discussed in detail. The angle shear of beam splitter based on Mach-Zehnder was analyzed under certain spectrum resolution combined design example. At same time, object characteristics of image plane intersection interference imaging system was studied. Image plane intersection interference imaging spectroscopy technology was verified in experiment.

Key words: interference imaging spectrometer; Fourier transform; angle shear beam splitter; image plane intersection interference

收稿日期: 2015-09-07; 修订日期: 2015-10-10

基金项目: 国防“十二五”预研基金

作者简介: 肖相国(1979-), 男, 博士, 主要从事光学设计及干涉光谱成像技术方面的研究工作。Email: xiao981216@163.com

0 引言

光谱成像技术能够同时获取目标空间和光谱信息,直接反映被观测目标的形状与光谱特征,揭示目标表面的物质成分。不同物体在不同谱带的反射特性存在差异,利用目标与背景在多个谱带的反射差异,光谱成像技术可实现伪装及遮掩目标的探测,在军事侦查、物质判别及伪装识别等领域具有重要的应用价值。大孔径静态干涉光谱成像技术(LASIS)是一种能量利用率高,图像信噪比好的光谱成像技术,且系统无运动部件、可靠性高,在卫星对地高光谱成像观测任务中发挥了巨大作用^[1-6]。LASIS 成像系统采用横向剪切分光干涉仪,技术成熟性好,已进入工程实用阶段,例如国内 HJ-1 和 CE-1 卫星上的高光谱成像仪均采用光束横向剪切分光干涉技术^[7-9]。Sagnac 型干涉仪是一种典型的横向剪切分光仪,工作在平行光路中(位于 LASIS 系统成像物镜前面),受成像物镜光学口径和视场限制,Sagnac 型干涉仪有效通光孔径很大。大口径 Sagnac 型干涉仪受光学材料性能、加工及胶合工艺等因素影响研制难度大、成本高,通过采用前置望远光学系统压缩光束口径,降低 Sagnac 型干涉仪的有效通光口径^[10]。这样造成 LASIS 光路复杂、透光率低且体积庞大,同时设计难度和研制成本大大增加。

像面相交干涉光谱成像技术是一种无狭缝大通光量静态干涉光谱成像技术,不但具有能量利用率高、可靠性好等特点,还具有干涉仪体积小等技术优点,可以解决航天高分辨率对地观测领域中的高光谱成像遥感设备工程研制问题。像面相交干涉光谱成像系统采用角剪切分束器在光学汇聚光路进行分光干涉,使得两景物像以一定夹角在焦平面探测器处相交干涉,并产生干涉图谱^[3,11-12]。与 LASIS 成像系统相比,像面相交干涉光谱成像系统中分光干涉仪有效通光孔径和体积大大减小,在空间高分辨率大通量静态干涉光谱成像系统研制过程中回避了长焦大视场干涉光谱成像系统中大通光口径分光干涉仪的研制难题。文中以 Mach-Zehnder 分光干涉仪为基础,对像面干涉光谱成像系统中角剪切分光干涉仪的工作原理和设计方法开展研究,并搭建实验验证设计方法的可行性。

1 像面相交干涉光谱成像原理

像面相交干涉光谱成像技术是最早被提出的一种大通量干涉光谱成像技术^[3],采用角剪切分束器使目标图像以一定夹角在焦平面上相交干涉^[11-12]。像面干涉光谱成像系统分光干涉仪工作在光学系统的汇聚光路中,分别将入射光束以一定角度投射在焦平面探测器上,相交并产生干涉光谱图样,如图 1 所示。

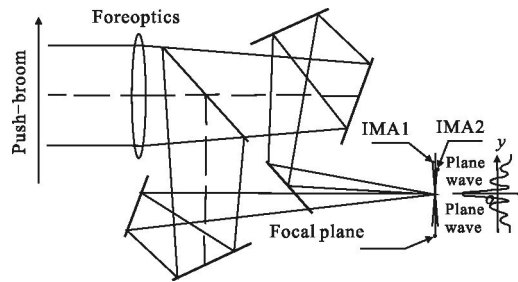


图 1 像面相交干涉光谱成像原理图

Fig.1 Principle of image plane intersection interference imaging spectroscopy

Mach-Zehnder 像面相交干涉光谱成像系统工作原理:在光学系统和焦平面之间加入 Mach-Zehnder 分束器;一束平行光进入相机系统汇聚在像面上一点,分束器将这束汇聚光线以一定角度分束,并使其在像面上某点等光程相交。相交两束光在焦平面处发生干涉现象,并产生光谱辐射 $B(\nu)$ 相关的干涉图样。干涉图样强度 $I(\delta)$ 记为:

$$I(\delta) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu) \times \cos(2\pi \times \nu \times \delta) d\nu \quad (1)$$

波数为 ν 的光辐射亮度记为 $B(\nu)$, $\nu_1 \sim \nu_2$ 表示干涉光谱成像系统的工作波段范围。对干涉图进行数据处理可得到目标的辐射光谱信息,如下公式表示:

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\delta) \times \cos(2\pi \times \nu \times \delta) d\delta \quad (2)$$

像面相交干涉光谱成像相机在像平面上只得到干涉图,对干涉图样进行一系列数学处理,可得到目标辐射光谱特征数据。

角剪切分束器是像面相交干涉光谱成像系统的核心器件,此文对基于多棱镜组合的实体型 Mach-Zehnder 角剪切分光干涉仪的工作原理及设计方法开展研究。

2 Mach-Zehnder 干涉仪设计分析

基于实体型 Mach-Zehnder 分束器的像面干涉光谱成像系统光路如图 2 所示,主要由三部分组成:前置物镜、实体型角剪切分束器和焦平面探测器。Mach-Zehnder 角剪切分束器工作在汇聚光路中位于光学成像系统与焦平面探测器之间。

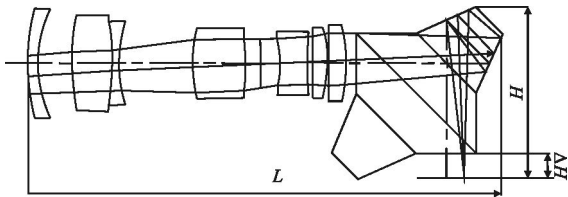


图 2 角剪切分光干涉光谱成像光路

Fig.2 Optical layout of the angle shear beam splitter

分束器位于前置物镜的汇聚光路中,普通的成像物镜不适合新型像面干涉光谱成像系统。笔者研制的前置物镜具有如下技术特点:(1)前置物镜具有较大的后工作距离;(2)前置物镜在较宽的工作波段范围内具有良好的成像质量;(3)前置物镜补偿校正角剪切分束器等效玻璃平板产生的附加像差,满足新型像面干涉光谱成像系统使用要求。

与其他干涉光谱成像系统中的分光干涉仪一样,例如 Sagnac 干涉仪等,分光干涉仪对分光有很高的要求。同时实体型 Mach-Zehnder 角剪切分束器的设计方法有自身特点,分两部分进行论述:光路展开结构研究和几何尺寸设计。

2.1 分束器展开结构

实体型 Mach-Zehnder 角剪切分束器虽然属于非共光路型分光干涉仪,但是两束光传输路径对称,对其中一束光的光路展开分析结果同样适用于另一光束。实体型 Mach-Zehnder 角剪切分束器沿光路展开结构如图 3 所示。图中, ϕD 为入射光束口径, L 为光路展开长度, H 为像平面干涉光谱成像系统光谱方向像高; LB 为 45° 等腰棱镜底边长度,对应的腰边长度为 D ; LD 为等腰棱镜 $E(A)$ 的底边长度, Y 为等腰棱镜 $E(A)$ 高度。经研究,存在如下数学关系:

$$\begin{cases} LB=2\times\sqrt{2} D \\ LD=\sqrt{2} D \\ Y\geq D-D(D-H)/L \end{cases} \quad (3)$$

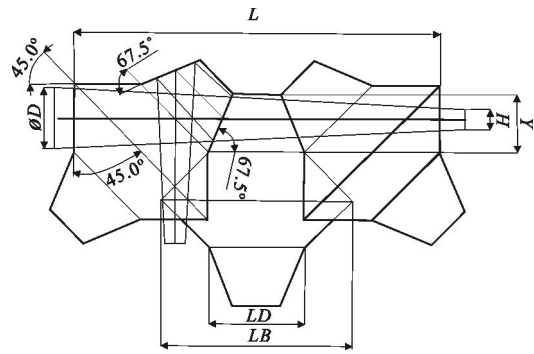


图 3 Mach-Zehnder 分束器光路展开图

Fig.3 Unfolded layout of the Mach-Zehnder

2.2 分束器设计参数计算

实体型 Mach-Zehnder 角剪切分束器设计参数的计算主要包括两部分内容,剪切角计算及光学等效长度计算。

2.2.1 剪切角计算

实体型 Mach-Zehnder 分束器剪切角大小与干涉光谱成像系统的光谱分辨率相关。例如,像面相交干涉光谱成像系统的光谱分辨率决定了系统最大采样光程差 Δ ,假设光谱方向采样像半高为 $H/2$,那么分束器角剪切量计算公式如下:

$$\theta=\arctan\left(\frac{\Delta}{H/2}\right) \quad (4)$$

当然光谱方向采样像半高为 $H/2$,是由探测器像素尺寸和系统光谱方向最小采样点决定的。

2.2.2 等效光路计算

根据图 3 几何关系,实体型 Mach-Zehnder 分束器的展开光学长度计算公式如下:

$$\begin{aligned} L &= 2\times D\times(1+0.5)+\frac{\sqrt{2}}{2}D\times(2+\sqrt{2})= \\ & 3\times D+\sqrt{2} D+D\approx \\ & 5.414D \end{aligned} \quad (5)$$

在可见光波及近红外波段,棱镜多采用理化性能良好的 K9 光学玻璃研制而成。用 K9 光学玻璃研制实体型 Mach-Zehnder 分束器时,其等效光路空气厚度为 L_{air} ,计算如下:

$$L_{\text{air}}=\frac{L}{n_{\text{K9}}}=\frac{5.414D}{1.5136}\approx 3.58D \quad (6)$$

式中: n_{K9} 为 K9 光学玻璃的折射率。由公式(6)分析可知,理论上实体型 Mach-Zehnder 像面干涉光谱成像仪中前置光学系统的 $F\#$ 最小值为 3.58,考虑的探

测器安装尺寸限制, $F\#$ 应该大于 4。

2.3 实体型 Mach-Zehnder 分束器实例

假定像面干涉光谱成像系统的系统指标如下: 工作波段为 $0.48\sim 0.95\ \mu\text{m}$, 有效通道数大于 120, 光束进入实体型 Mach-Zehnder 分束器的有效通光口径为 30 mm。根据干涉光谱理论计算得到分束器设计相关指标如下: 最大光程差为 $58.2\ \mu\text{m}$; 光谱方向最小采样点数为 243; 光谱方向半像高为 1.7 mm; 根据公式(4)通过以上数据计算 Mach-Zehnder 分束器角剪切量:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta}{H/2}\right) = \arctan\left(\frac{58.2\ \mu\text{m}}{1.7\ \text{mm}}\right) = 1.96^\circ \quad (7)$$

如图 3 所示, 根据光学系统设计结果, 入射实体型 Mach-Zehnder 分束器的光束有效通光口径 $D=30\ \text{mm}$ 。由公式(5)计算可知, 实体分束器光学展开长度为 162.42 mm。根据公式(3)可计算出分光干涉仪的其他几何设计尺寸。

3 实验验证

实体型 Mach-Zehnder 像面干涉光谱成像系统主要由三部分组成: 前置成像物镜、实体型 Mach-Zehnder 分光干涉仪、CCD 焦平面探测器(或 CMOS)。采用复杂技术工艺完成像面干涉光谱成像系统中实体型 Mach-Zehnder 干涉仪的高精度装调及胶合工作。实体型 Mach-Zehnder 像面干涉光谱成像系统采用如图 4 所示实验方案: (1) 积分球产生单色或复色光源。(2) 在实验室平台上采用 Mach-Zehnder 干涉光谱成像系统对积分球出口成像, 由于物距较近, 干涉光谱成像系统的成像位置严重偏离理论设计值, 也不满足工程使用的要求。(3) 投射物镜, 在积分球与 Mach-Zehnder 干涉光谱成像系统之间加入投射物镜, 将近距离目标等效投射到无限远位置处的目标, 使得装调过程中干涉光谱成像系统中的成像位置与设计值相符, 也满足外场使用的要求。

采用不同波长位置的滤光片对实体型 Mach-Zehnder 干涉光谱成像系统进行成像实验, 得到不同波长、带宽的干涉条纹图样, 分别如图 5~图 7 所示。其中, 图 5 采用窄带滤光片的峰值波长值为 552 nm, 图 6 采用窄带滤光片的峰值波长值为 656 nm, 图 7 采用窄带滤光片的峰值波长值为 760 nm。



图 4 像面相交干涉光谱成像实验

Fig.4 Imaging experiment of image plane intersection interference imaging spectroscopy

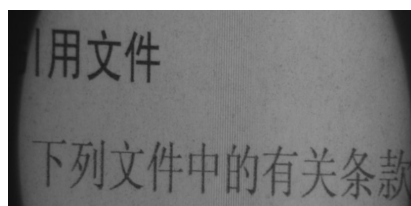


图 5 峰值波长值为 552 nm 的干涉条纹图样

Fig.5 Interference pattern at the peak wavelength of 552 nm

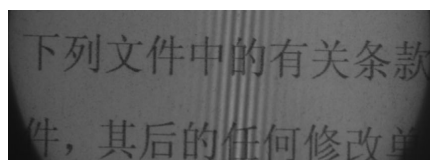


图 6 峰值波长值为 656 nm 的干涉条纹图样

Fig.6 Interference pattern at the peak wavelength of 656 nm

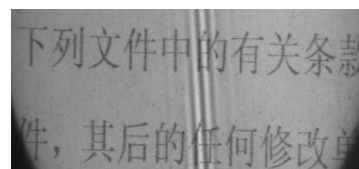


图 7 峰值波长值为 760 nm 的干涉条纹图样

Fig.7 Interference pattern at the peak wavelength of 760 nm

分析图 5~图 7 得到如下结论: 峰值波长位置变化时干涉条纹间距也发生变化, 并且波长越长干涉条纹间距越大; 窄带滤光片的半高带宽值越大, 干涉条纹分布的宽度也越大。

如上两点结论与干涉光谱学基本理论吻合, 充分说明所提出的实体型 Mach-Zehnder 干涉光谱成像技术方案可行。

4 结论

基于多棱镜组合的实体型 Mach-Zehnder 像面相交干涉光谱成像技术是一种紧凑型大通光量光谱成像技术, 且具有干涉仪体积小、性能稳定可靠等技

术特点。同时,实体型 Mach-Zehnder 角剪切分束器工作在光学成像系统的会聚光路中,体积小,可解决了长焦距大孔径干涉光谱成像中分束器(也叫干涉仪)研制难题。

该技术的推广应用可简化国内星载高光谱成像机的光机结构,提高其工作效率,同时也减小星载高光谱成像遥感设备的体积和质量,满足小卫星平台的搭载需求。该技术也为国内高分辨率对地观测专项中高光谱成像遥感技术进一步发展提供可行技术方案。

参考文献:

- [1] Horton R F, Byers T, Conger C. HEIFTS PHASE II -Laboratory and advanced simulation results[C]//SPIE ,2000, 4132: 95-205.
- [2] Horton R F. Optical design for a high etendue imaging fourier transform spectrometer[C]// SPIE, 1996, 2819: 300-314.
- [3] Harnisch B, Posselt W, Holota K, et al. Compact Fourier -transform imaging spectrometer for small satellite missions [J]. *Acta Astronautica*, 2003, 52(9-12): 803-811.
- [4] Hua Wenshen, Yang Jia, Liu Xun, et al. Camouflage assessment based on hyperspectral characteristics [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(6): 964-967. (in Chinese)
华文深, 杨佳, 刘恂, 等. 基于高光谱特征的迷彩伪装评价 [J]. *应用光学*, 2013, 34(6): 964-967.
- [5] Li Yongshuai, Wang Zhibin, Chen Youhua, et al. Optical design of large FOV imaging system for AOTF imaging spectrometer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(1): 41-45. (in Chinese)
李永帅, 王志斌, 陈友华, 等. 大视场声光可调谐滤波器成像光谱仪光学设计[J]. *应用光学*, 2015, 36(1): 41-45.
- [6] Lu Xuefeng, Bai Qinglan. Optimal design for Sagnac interferometer of imaging spectrometer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(4): 666-669. (in Chinese)
逯雪峰, 白清兰. 基于成像光谱仪的 Sagnac 干涉仪的优化设计[J]. *应用光学*, 2012, 33(4): 666-669.
- [7] Bai Jiaguang, Wang Zhonghou, Bai Qinglan, et al. A study on design method for Sagnac interferometer of lateral shearing [J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(2): 87-91. (in Chinese)
白加光, 王忠厚, 白清兰, 等. Sagnac 横向剪切干涉仪设计方法的研究 [J]. *航天器工程*, 2010, 19(2): 87-91.
- [8] Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Chang Lingying, et al. Optical design and on-orbit performance evaluation of the imaging spectrometer for Chang'e-1 Lunar Satellite [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 479-483. (in Chinese)
赵葆常, 杨建峰, 常凌颖, 等. 嫦娥一号卫星成像光谱仪光学系统设计与在轨评估[J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 479-483.
- [9] Xiangli Bin, Wang Zhonghou, Liu Xuebin, et al. Spatially modulated Fourier transform hyperspectral imager for HJ-1A satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18 (6): 43-47. (in Chinese)
相里斌, 王忠厚, 刘学斌, 等. 环境减灾-1A 卫星空间调制型干涉光谱成像仪技术[J]. *航天器工程*, 2009, 18(6): 43-47.
- [10] Lucey P G, Horton K, Williams T, et al. High-performance Sagnac interferometer using uncooled detectors for infrared hyperspectral applications[C]//SPIE, 2007, 6565: 65650S.
- [11] Horton R F. High Etendue imaging Fourier transform spectrometer: US Patent, 5777736[P]. 1998-07-07.
- [12] Horton R F. Optical design for a high Etendue imaging Fourier transform spectrometer [C]//SPIE Proceedings, 1996, 2819: 300-314.
- [13] Paul Vermande, Christian Bull, Francis Delbru. Interferometric Spectro-Imager System (ISIS) [C]//SPIE Proceedings, 1987, 810: 117-124.