

doi: 10.3788/gzxb20184703.0312002

紧凑型空间外差成像光谱仪设计

尹诗^{1,2}, 冯玉涛¹, 白清兰¹, 孙晨^{1,2}, 张亚飞^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:设计了一种适合微小卫星平台应用的紧凑型空间外差成像光谱仪,该系统利用两套干涉结构将干涉条纹定域于系统外部,并将前置透镜的成像面与系统干涉面重合以获取目标的空间位置信息和光谱信息.根据系统轴上光表达式和奈奎斯特采样定律,给出了系统光谱分辨率和光谱范围与元件参数的匹配关系.通过光线追迹的方式,理论证明了干涉图定域位置,并推导了普适仪器函数表达式.针对氧原子气辉(O^{[1]D}]630 nm)星载测量,完成了该紧凑型空间外差成像光谱仪的系统设计和仿真,系统光谱采样间隔为 0.762 3 cm⁻¹,光谱范围为 601.674 9~631.324 6 nm.最后通过搭建实验装置获取 632.8 nm 激光光源的目标图像和复原光谱.仿真和实验结果表明:系统光谱采样间隔达到设计要求,且光谱分辨能力为 20 822(@630 nm);λ/4 波长和线偏振器的装调误差(±1°)对系统干涉图调制影响很小.该系统具有成像能力和光谱探测能力,可作为一种时空联合型干涉光谱仪使用.

关键词:光谱学;空间外差;光学设计;成像光谱仪;气辉

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)03-0312002-9

Design of Compact Spatial Heterodyne Imaging Spectrometer

YIN Shi^{1,2}, FENG Yu-tao¹, BAI Qing-lan¹, SUN Chen^{1,2}, ZHANG Ya-fei^{1,2}

(1 Xi'an Institute of Optics Precision Mechanic of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A compact spatial heterodyne imaging spectrometer suitable for micro satellite platforms is designed. Two sets of interference structures are used to make the fringes localized outside the system. The imaging plane of front lens system and fringe localization of system are overlapped so that the spatial location information and the spectral information of target are obtained. According to the expression of axis optical field and Nyquist sampling theorem, the relationship between spectral resolution and spectral range and some critical parameters is given. Through the way of ray tracing, the theoretical proof of fringe localization is described in detail, and the universal function expression of instrument is derived. This compact spatial heterodyne imaging spectrometer for observation of O^{[1]D}]630nm airglow from satellite is designed and simulated. The spectral sampling interval of the system is 0.762 3 cm⁻¹ and the spectral range is 601.674 9 ~ 631.324 6 nm. Finally, a compact spatial heterodyne imaging spectrometer is built to verify the results. And the target image and recovery spectrum of the 632.8nm laser source is obtained. The simulation and experimental results show that spectral sampling interval of the system achieve the design requirements, and the spectral is 20 822 at 630nm. The alignment error (±1°) of quarter-wave plate and polarizer has little influence on the modulation of fringes. It shows that the system has the imaging capabilities and spectral detectability, and can be used as a spatiotemporal mixed modulated spectrometer.

Key words: Spectroscopy; Spatial heterodyne; Optical design; Imaging spectrometer; Airglow

基金项目:国家自然科学基金(No. 41005019),西部青年学者(No. XAB 2016A07)资助

第一作者:尹诗(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为光学系统设计. Email: yinshi@opt.cn

导师(通讯作者):冯玉涛(1980—),男,研究员,博士,主要研究方向为光谱成像技术. Email: fytciom@126.com

收稿日期:2017-10-09;录用日期:2017-12-13

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

0 引言

空间外差干涉仪是 20 世纪 90 年代发展起来的一种高光谱分辨傅里叶变换光谱仪,具有高通量、高光谱分辨能力,且无运动部件^[1],被广泛应用于星际介质辐射探测^[2-3]、大气成分探测^[4-5]、天文观测^[6-7]等领域.空间外差干涉仪的基本结构与迈克尔逊干涉仪类似,不同的是空间外差干涉仪用两块平面闪耀光栅替换了迈克尔逊干涉仪两个干涉臂上的平面反射镜,从而形成一种双光束、等厚、空间调制的定域干涉^[8].且系统干涉定域面的位置位于干涉仪内部的光栅面附近,故需利用成像光学系统将干涉定域面成像至探测器靶面.可见,传统空间外差干涉仪的光学系统一般由前置光学组件、干涉仪和条纹成像光学组件三部分构成,其主要是全透射式干涉仪,如 2002 年 HARLANDER J 等研制的中层大气羟基空间外差成像仪 (Spatial Heterodyne Imager for Mesospheric Radicals, SHIMMER) 系统^[4].即使在某些特定应用条件下采用全反射结构和反射式成像镜组以实现系统小型化、紧凑化设计,系统整体结构仍十分复杂,且将带来元件工艺和系统装调要求的提高,如 2004 年 HARLANDER J M 等提出采用全反射式空间外差干涉仪探测太阳系紫外星际介质^[9].直到 2013 年 HARLANDER J M 等提出了一种紧凑型实条纹空间外差成像光谱仪的技术方案,采用两个独立的干涉仪模块的组合将干涉面定域在干涉仪外,大大简化了空间外差干涉仪系统结构^[10];2014 年费小云等给出了紧凑型空间外差成像光谱仪的干涉表达式^[11].本文在上述研究基础上进一步研究紧凑型实条纹空间外差光谱技术,分析证明干涉图定域于干涉仪外时的干涉基础理论,讨论系统结构参数对定域位置的影响;推导全系统仪器函数,据此分析系统分辨率、能量利用率和干涉效率的影响因素;验证系统的光谱分辨能力和成像能力,以氧原子气辉(O^{[1]D}]630nm)光谱成像观测为例,进行了紧凑型空间外差成像光谱仪光学系统设计、仿真以及实验验证.

1 基本原理

如图 1,空间外差干涉仪的基本结构是以一定角度放置的平面闪耀光栅取代迈克尔逊干涉仪两臂的平面镜,任一入射波面经过分束器和两臂光栅的作用后,将在干涉仪出口形成两个具有一定夹角 2γ (γ 值与入射光波长相关)的相干波面,两波面的相对位置和夹角通过光程差决定干涉面上的横向光强分布,干涉图定域在干涉仪光栅附近,最后由条纹成像镜系统将干涉条纹成像于探测器上^[9].

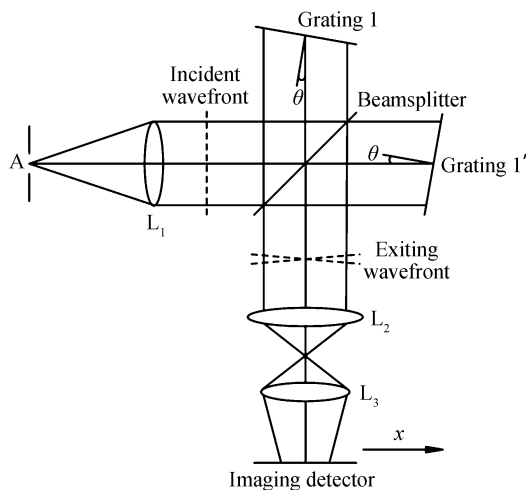


图 1 空间外差干涉仪结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of spatial heterodyne spectrometer configuration

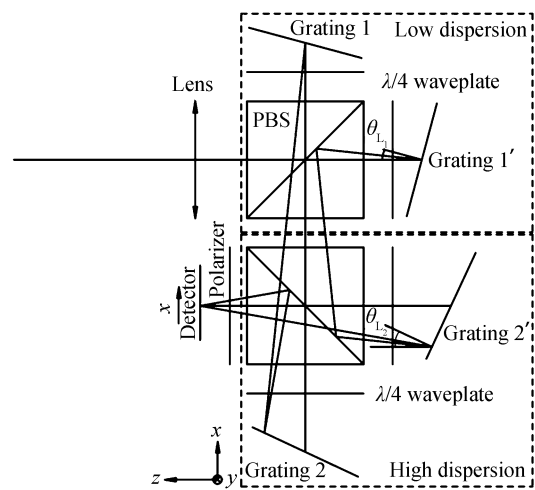


图 2 紧凑型空间外差成像光谱仪结构示意图

Fig.2 Schematic diagram compact spatial heterodyne imaging spectrometer configuration

如图 2,紧凑型空间外差光谱成像仪是传统空间外差干涉仪的一种变型,主要由前置物镜、低色散干涉仪模块、高色散干涉仪模块以及探测器组成.其中低色散模块和高色散模块在结构上都与传统空间外差干涉仪基本相同,不同的是紧凑型空间外差成像光谱仪所用的分束元件为偏振分束器(Polarizing Beam Splitter,

PBS),同时各个光栅前置有 $\lambda/4$ 波片,此外在高色散干涉仪模块出口另置有检偏器,以实现有效干涉光束匹配并消除相干光束在两个模块之间多次反射形成的干扰。

紧凑型空间外差光谱成像仪通过低色散模块与高色散模块的参数匹配可以使干涉图定域于干涉仪外部,全系统仅需要一组前置望远镜即可实现对观测目标干涉图和影像的获取,省去了传统空间外差干涉仪系统所需的条纹成像镜组,易于实现紧凑的小型化设计。

1.1 系统基本原理

紧凑型空间外差成像光谱仪轴上光束干涉图的理论表达式为^[11]

$$I(x) = \int_0^\infty B(\sigma) \cdot \{1 + \cos [2\pi \cdot 4(\sigma - \sigma_0) (\tan\theta_{L2} - \tan\theta_{L1}) x]\} d\sigma \quad (1)$$

式中, θ_{L1} 和 θ_{L2} 分别为低色散模块和高色散模块的光栅 Littrow 角, $B(\sigma)$ 为入射光谱.根据式(1)可知系统干涉条纹频率 f_x 为

$$f_x = 4(\sigma - \sigma_0) (\tan\theta_{L2} - \tan\theta_{L1}) \quad (2)$$

由于在数据反演时,存在两条谱线 σ_1 和 σ_2 ,使得 $f_{x1} = -f_{x2}$,即对于干涉图的条纹数而言,会有两条谱线与之相对应,因此在实际工作中为避免此种情况的出现,要采用滤波片将 Littrow 波数一端的光谱截断^[12].

由采样定理可知,一个条纹周期至少需要两个像元进行采样,则系统的光谱分辨率 $\delta\sigma$ 为

$$\delta\sigma = \frac{1}{4W_{CCD} \cdot (\tan\theta_{L2} - \tan\theta_{L1})} \quad (3)$$

式中, W_{CCD} 为系统探测器的宽度.由光谱范围 $\Delta\sigma$,采样数 N 和光谱分辨率 $\delta\sigma$ 的关系($\Delta\sigma = N \cdot \delta\sigma/2$),可知系统光谱范围为

$$\Delta\sigma = \frac{N}{8(\tan\theta_{L2} - \tan\theta_{L1}) \cdot W_{CCD}} \quad (4)$$

1.2 系统定域面位置的证明

任一波长的轴上光进入干涉系统后的光束传输路径和偏振态变化示意如图 3,轴上光经过分束作用分为两束相干光,两束相干光的出射波面最终以夹角 2δ 交于光轴上一点 K ,通过 K 点与光轴垂直的平面即为全系统的干涉定域面.以高色散模块分束器中心 O 为坐标原点建立右手坐标系, x 轴平行于探测器采样方向, y 轴垂直纸面向里, z 轴平行于光轴方向. l 为两个色散模块的分束器中心的距离, d_1 和 d_2 分别为两个分束器中心到光栅的距离,不考虑分束棱镜折射率影响的情况下,通过光线追迹计算可以求得 K 点坐标为

$$\begin{cases} z = \frac{(\cot\delta + \tan\theta_{L2})(l + d_1) + (\cot\delta - \cot\gamma)d_2}{\cot\gamma + \tan\theta_{L2}} \\ y = 0 \\ x = 0 \end{cases} \quad (5)$$

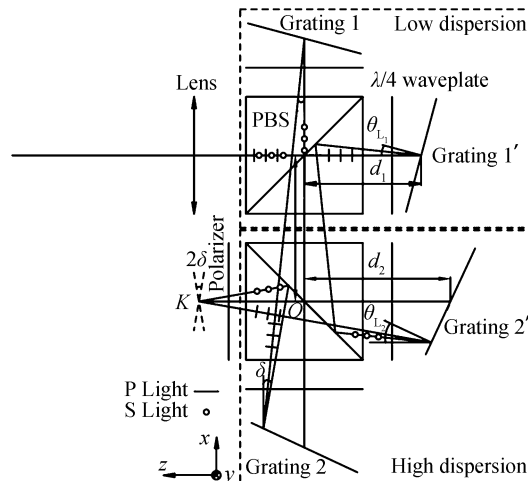


图 3 系统光路传输图

Fig.3 Light path diagram of the system

其中, γ 和 δ 分别为光线入射到低色散干涉仪模块和高色散干涉仪模块的光栅时衍射出射光线与光轴的夹角, 两条干涉臂的出射光线在系统出口的夹角为 2δ . 实际情况中 γ 和 δ 为小量并且 γ 略小于 δ , 根据 \cot 函数的性质可知, 式(5)中, $z \approx (l+d_1) \cot(\delta) / \cot(\gamma)$, 而 $(l+d_1)$ 一定大于系统的分束器尺寸, 因此系统的定域平面在高色散模块之外. 当设计前置透镜的成像面和干涉仪的定域面重合时, 此系统可作为一种时空联合型干涉光谱仪使用.

1.3 系统的仪器函数模型

在工程实践中, 式(1)无法直接用于分析系统的辐射传输特性和干涉效率, 本文基于紧凑型空间外差成像光谱仪结构特点, 结合干涉原理和偏振光学理论, 推导给出紧凑型空间外差成像光谱仪的仪器函数模型. 组成干涉仪的各元件琼斯矩阵如表 1.

表 1 元件的琼斯矩阵
Table 1 Jones matrix of elements

Element	Jonesmatrix
Polarizing beam splitter (PBS is assumed to be an ideal component)	Transmission: $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_p & 0 \\ 0 & t_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ Reflection: $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Grating (assuming that the reflection coefficient of the complex amplitude of S light and P light is the same)	$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -r_{GP} & 0 \\ 0 & r_{GS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{R_G} & 0 \\ 0 & \sqrt{R_G} \end{bmatrix}$
Quarterwave plates	$\mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_n + i \sin^2 \theta_n & (1-i) \sin \theta_n \cos \theta_n \\ (1-i) \sin \theta_n \cos \theta_n & \sin^2 \theta_n + i \cos^2 \theta_n \end{bmatrix}$
Polarizer	$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_0 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_0 \\ \frac{1}{2} \sin 2\theta_0 & \sin^2 \theta_0 \end{bmatrix}$

表 1 中 R_G 为闪耀光栅的衍射效率(S 光和 P 光相同), θ_0 和 θ_n 分别为线偏振器和 $\lambda/4$ 波片与垂直色散主截面的 y 轴(图 3)所成角度, $n=1, 2, 3, 4$.

根据图 3 的光路传输, 当光经过前置透镜和滤光片后, 经低色散模块中的 PBS 分为 P 光和 S 光, 透射的 P 光经过 $\lambda/4$ 波片入射到闪耀光栅衍射返回, 由于光路中加入 $\lambda/4$ 波片, 它能使两次经过 $\lambda/4$ 波片的光振动方向转过 90° , 即 P 光变为 S 光^[13]. 同理反射的 S 光在低色散模块出口变为 P 光. 高色散模块和低色散模块类似, 由于 PBS 和 $\lambda/4$ 波片的作用, 只改变的光的偏振状态, 则从光栅 2 反射回来的 P 光和光栅 2' 反射回来的 S 光经过检偏器在探测器处形成干涉条纹.

根据光路传输的描述, 光束孔径角可以分解为沿色散主截面的 β 角和垂直色散主截面的 ϕ 角, 结合偏振光学理论和表 1 所示干涉仪元件的琼斯矩阵表达式, 对于复色光源, 紧凑型空间外差成像光谱仪干涉图采样点的积分辐亮度可表示为

$$I(x) = \Omega_m a \tau R_G^2 \int_{-\infty}^{\infty} B_e(\sigma') d\sigma' \left\{ 1 + \left(\frac{b}{a}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{\sigma \Omega_m \cdot 4(\tan \theta_{L2} - \tan \theta_{L1})x}{2\pi}\right) \cdot \cos\left\{2\pi \cdot 4x(\tan \theta_{L2} - \tan \theta_{L1})\left[(\sigma - \sigma_0) \cdot \left(1 - \frac{\Omega_m}{4\pi}\right) - \left(\frac{\sigma_0 \Omega_m}{4\pi}\right)\right]\right\}\right\} \quad (6)$$

式中, $a = [\sin^2(2\theta_0)/4 + \sin^4(\theta_0)] \cdot \sin^2(2\theta_1) \cdot \sin^2(2\theta_3) + [\sin^2(2\theta_0)/4 + \cos^4(\theta_0)] \cdot \sin^2(2\theta_4) \cdot \sin^2(2\theta_2)$, $b = \sin(2\theta_0) \cdot \sin(2\theta_1) \cdot \sin(2\theta_2) \cdot \sin(2\theta_3) \cdot \sin(2\theta_4)$, $\sigma' = \sigma - \sigma_0$, τ 为系统中光学元件的透过率乘积, $\Omega_m \approx \pi \cdot (\beta^2 + \phi^2)$ 为干涉光束的极限立体角.

式(6)为包含全孔径干涉特性的仪器函数, 当 $\theta_0 = \theta_n = \pi/4$, 且只考虑轴上光时, 式(6)可以变为式(1), 可见, 干涉图强度 I 与系统透过率乘积 τ 、光栅衍射效率 R_G 、干涉光束极限立体角 Ω_m 成正比.

与传统空间外差干涉仪相比, 紧凑型空间外差光谱仪采用偏振分束器、 $\lambda/4$ 波片和检偏器消除两次分光带来的光束回授, 其理论能量利用率与传统空间外差干涉仪相同($a=1$), 在工程研制中 a 一般大于 0.98 (θ_0 和 θ_n 的误差在 $\pm 1^\circ$). 但由于光栅衍射效率 $R_G < 1$, 所以只有当系统光学透过率 $\tau > \tau_0/R_G$ 时 (τ_0 为传统空间

外差干涉仪光学系统透过率),系统才能在能量利用率上体现出优势。

与传统空间外差干涉仪相同,紧凑型空间外差成像光谱仪的干涉图对比度同样受到干涉光束极限孔径角 Ω_m 的影响,表现为 Sinc 函数的调制,除此之外,紧凑型空间外差成像光谱仪干涉图的对比度还会由于 $\lambda/4$ 波片和检偏器的失调而降低。

2 系统设计与仿真

2.1 设计实例

针对中高层大气氧原子气辉精细光谱(红线 O^{[1]D}630 nm)的星载测量,设计了紧凑型空间外差成像光谱仪,系统基本参数如表 2,该系统光谱范围为 601.674 9~631.324 6 nm,光谱分辨率为 $0.762 3\text{cm}^{-1}$,角分辨率约为 $0.002 1^\circ$ 。

系统的前置透镜设计首先要根据探测器像元尺寸、角分辨率要求,结合干涉仪物理尺寸要求等确定前置物镜的光学参数和结构,为了保证全视场具有长后截距和相同的干涉特性,选用光阑前置的远心光路设计。按照光谱分辨率计算系统可承受的极限 F 数为 50,此时系统的光通量很小,系统需要加入扩视场棱镜以提高干涉光束极限立体角 Ω_m ^[14],从而提高系统的可承受的极限 F 数,扩视场棱镜的计算方法在文献[15]中有详细说明,此处不再赘述。

表 2 紧凑型空间外差成像光谱仪的系统参数
Table 2 Parameters of the compact spatial heterodyne imaging spectrometer

Component	Description
Front lens	Telecentric Focal length:200 mm Field ofview:7° F number:10
Polarizing beam splitter	Cube:50 mm×50 mm×50 mm Material:H-K9L
Detector	Pixelpitch:7.4 μm Array size:2 048×2 048
Grating G ₁ or G ₁ '	Groove density:600 g/mm Blaze angle:10.917 6°
Grating G ₂ or G ₂ '	Groove density:1 200 g/mm Blaze angle:22.259 1°
Prism 1 or 1'	Wedge angle:8.369 0° Incident angle:4.529 0° Material:H-ZF52A
Prism 2 or 2'	Wedgeangle:15.770 0° Incident angle:8.224 0° Material:H-ZLAF4LA

利用表 2 中的设计参数进行光学系统优化,光学系统如图 4,成像质量评价如图 5.图 5(a)是系统点列图,图中矩形尺寸和一个像元尺寸相等.加入干涉仪后系统失去了旋转对称性,故对 X 视场($\pm 0.707, \pm 1$)和 Y 视场($0, \pm 0.707, \pm 1$)均进行了分析,各个视场弥散斑尺寸均小于像元尺寸.图 5(b)是系统调制传递函数 (Modulation Transfer Fuction, MTF),在 70 lp/mm 处各视场传递函数值大于 0.35 并接近衍射极限。

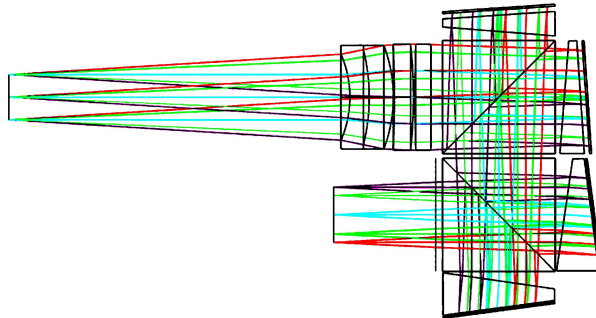


图 4 紧凑型空间外差光谱成像仪光学系统图

Fig.4 Optical system diagram of compact spatial heterodyne imaging spectrometer

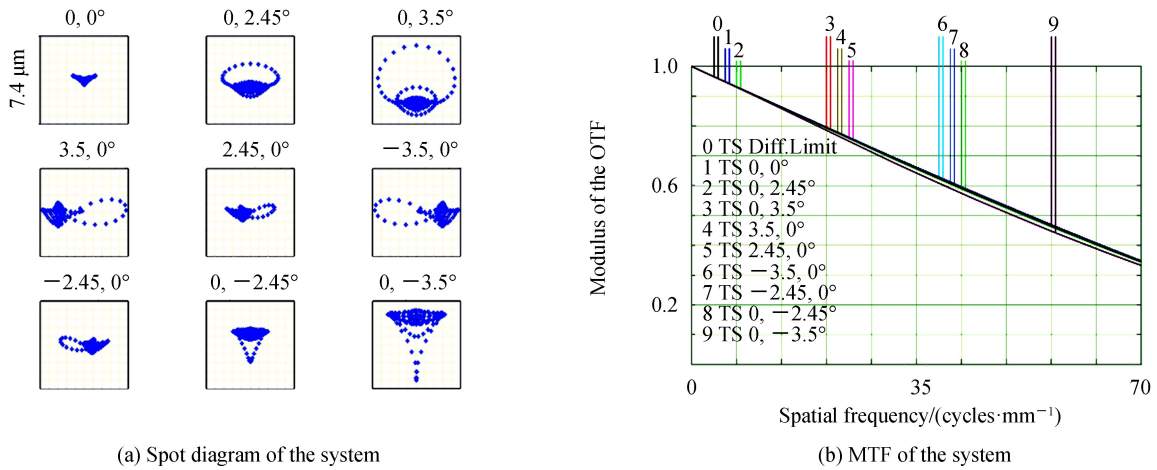


图5 系统优化结果
Fig.5 Optimization results of the system

2.2 仿真验证

为验证系统参数的正确性,分析紧凑型空间外差成像光谱仪的成像能力以及干涉特性,模拟光源入射波长为 630 nm,光源图像如图 6.理论上谱线 630 nm 的条纹周期为 $346.8845 \mu\text{m}$,在图所示的坐标范围($x = -7.5776 \sim 7.5776 \text{ mm}$)应有 43.6895 个条纹周期.仿真结果如图 7,图中出现了 43 个条纹周期,理论和仿真的差异来自于扩视场棱镜的色散效应,而此差异只要小于一个条纹周期就可以证明仿真结果的准确性^[16],此时系统的光谱分辨能力为 20 822(@630 nm).结果表明该系统的设计参数正确可靠,同时该系统具有成像能力,可作为时空联合调制型干涉光谱仪使用.

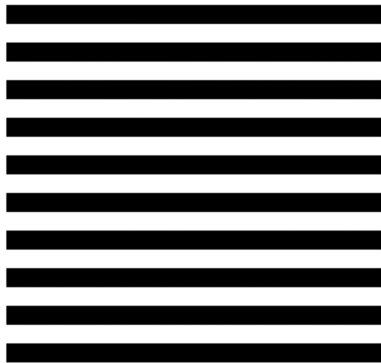


图6 目标图像
Fig.6 Image of target

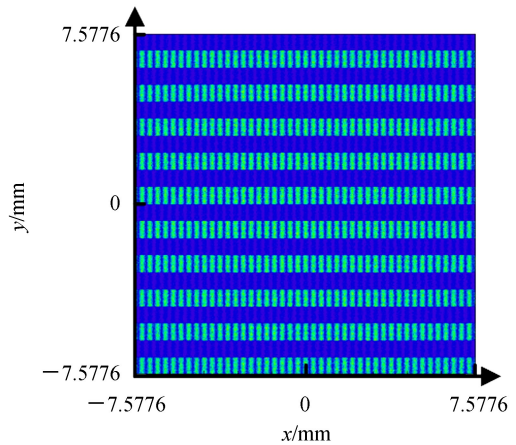
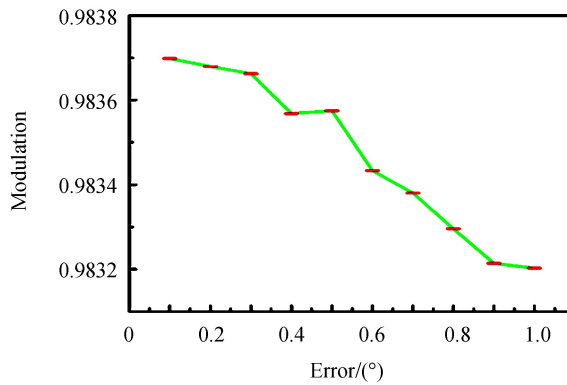


图7 630 nm 谱线干涉图像
Fig.7 Interferogram of 630 nm spectral line

2.3 $\lambda/4$ 波片和检偏器误差分析

紧凑型空间外差成像光谱仪中存在的偏振元件为线偏振器和 $\lambda/4$ 波片,为保证系统的能量利用率,透光轴与垂直色散主截面的 y 轴所成角度必须为 45° ,但在实际装调中,难免会造成线偏振器和 $\lambda/4$ 波片的透光轴与 y 轴的角度偏差,因此有必要分析装调误差调制度的影响.

根据式(6)和光学参数可建立该系统的数学模型,将偏振器和 $\lambda/4$ 波片的透光轴与 y 轴的角度 θ_n 作为变量,且 θ_n 满足 $N(45^\circ, e)$ 的正太分布关系, $n \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$,由于一般波片和线偏振器的角度刻度值为 2° ,因此取 $e \in \{0.1^\circ, 0.2^\circ, \dots, 1.0^\circ\}$.通过仿真可知在 F 数为 10 时,系统边缘光线的干涉光强度在 $x = -7.2666 \text{ mm}$ 和 $x = -7.0890 \text{ mm}$ 分别取得最大值和最小值,因此对系统 F 数为 10,波长为 630 nm 的光学系统进行光线追迹,系统边缘光线的调制度和 θ_n 的误差 e 的关系如图 8,由图可知 θ_n 的随机变化对干涉光调制度影响很小,因此对于实际装调是非常有利的.

图8 系统调制度和 θ_n 的误差的关系图Fig.8 Relationship between the modulation and the deviation of θ_n

3 实验验证

为进一步验证设计参数的可靠性,搭建了紧凑型空间外差成像光谱仪实验平台,并进行光谱成像实验.实验装置如图9,实验光源采用632.8 nm的He-Ne激光器,虽然632.8 nm的光不在设计的光谱范围内,但由第1.1节的分析,可认为该系统的光谱范围为631.324 6~664.047 9 nm,系统依然可用.由于实验中采用成品光学元件和调整结构件,干涉仪空间布局增大,故前置透镜的后截距需要增加,因此采用700 mm焦距的单透镜进行实验.实验光源出射的激光经扩束镜扩束后,通过光阑打在毛玻璃上产生发散的光将目标照亮,然后经准直镜后进入系统.

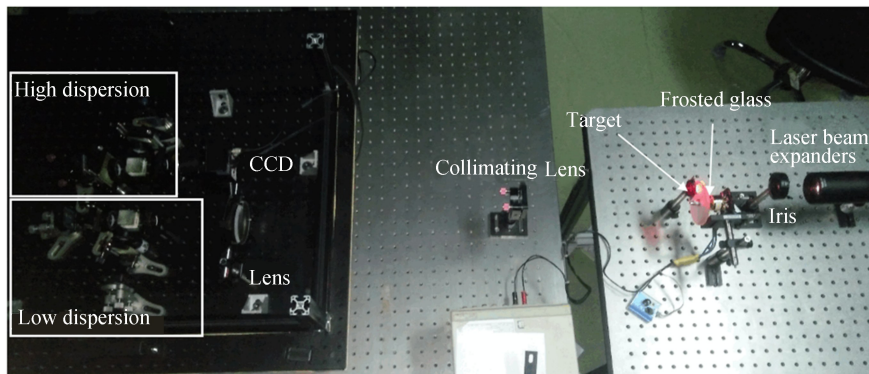


图9 试验装置

Fig.9 Experimental setup of the system

图10为632.8 nm He-Ne激光器的原始干涉图,其中横向的黑白条纹是目标图像信息,纵向是对应光源波长的干涉条纹,图11为原始干涉图的550~570行和650~670行数据的复原光谱,可见复原光谱强度与目标亮暗一一对应.实验结果充分验证了紧凑型空间外差成像光谱仪干涉定域面与系统成像面重合的特点,说明系统同时具有光谱和成像的探测能力,可以作为一种时空联合调制型干涉仪使用.

图10中整个探测器采集到的完整干涉条纹周期平均值为48个.根据理论计算,632.8 nm的条纹周期为 $312.8004 \mu\text{m}$,在探测器范围($-7.5776 \sim 7.5776 \text{ mm}$)内应有48.4501个条纹周期,实验结果和理论基本相符合.实验中采用的He-Ne激光器频率稳定精度为2 MHz($\sim 6.67 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$),对于实验系统而言,可以认为是理想单色光.因此,对两组复原光谱曲线分别进行拟合和插值处理,得到细分的复原光谱曲线即为实验系统的光谱响应函数,如图11中局部放大图所示.可见650~670行干涉图的复原光谱的中心波数位置在46.9000,光谱相应函数半高宽为1.7811个光谱采样间隔;550~570行干涉图的复原光谱曲线的中心波数位置在47.0000,半高宽为1.6698个光谱采样间隔.可以看出目标图像中不同空间位置的复原光谱一致性很好.实验系统的设计光谱采样间隔为 $\delta\sigma = 0.7623 \text{ cm}^{-1}$,632.8 nm对应的光谱维坐标为48.4468,可见,实验结果和设计值相差1.5个采样点,这一误差来源于实验装置调整过程中光栅Littrow角的误差,导致实验系统的Littrow波数发生了微小变化.上述差异不影响对紧凑型空间外差光谱原理和设计验证结果的正确

性,在工程实践中,使用仪器前会对系统进行准确的光谱定标消除上述系统误差.

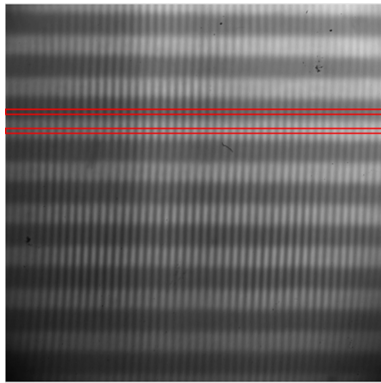


图 10 632.8nm 光谱实验结果

Fig.10 Experimental result of 632.8nm spectrum

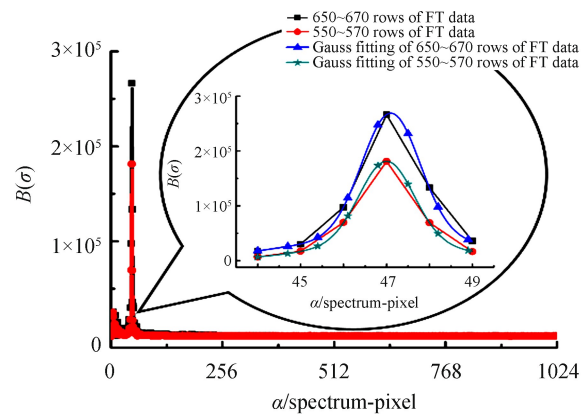


图 11 632.8nm 的傅里叶变换光谱

Fig.11 FT-spectrum of 632.8nm

4 结论

本文指出紧凑型空间外差成像光谱仪可作为一种时空联合调制型干涉仪应用.从理论上证明了系统干涉图定域面在干涉仪外部,并给出系统总能量表达式,通过分析发现系统能量利用率与系统透过率乘积、光栅衍射效率、干涉光束极限立体角成正比.针对氧原子红线(O^1D)630 nm)气辉星载测量为例,开展了光学系统设计仿真,系统中偏振元件装调误差对干涉图调制度影响非常小,通过搭建平台实验装置,验证了理论分析和仿真设计的正确性,同时也进一步验证了紧凑型空间外差成像光谱仪的光谱成像探测能力.本文的研究结果对用于空间、大气精细光谱成像探测的微小卫星载荷设计研制具有借鉴意义.

参考文献

- [1] HARLANDER J, ROESLER F L, ENGLERT C R. Spatial heterodyne spectroscopy for high spectral resolution on space-based remote sensing [J]. *Optics & Photonics News*, 2004, **15**(1): 46-51.
- [2] MIERKIEWICZA E J, ROESLER F L, HARLANDER J, et al. First light performance of a near UV spatial heterodyne spectrometer for interstellar emission line studies[C]. SPIE, 2004, **5492**: 751-766.
- [3] WATCHORN S, ROESLE F L, HARLANDER J, et al. Development of the spatial heterodyne spectrometer for VUV remote sensing of the interstellar medium[C]. SPIE, 2001, **4498**: 284-295.
- [4] HARLANDER J, ROESLER F L, CARDON J G, et al. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth's middle atmosphere[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(7): 1343-1352.
- [5] YUNLONG LIN, SHEPHERD G, SOLHERIM B, et al. Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development[C]. ITSC-X IV Proceeding Beijing (Poster), China, 2005.
- [6] DAMIANI C, DROSSART P, SÉMERY A, et al. An imaging heterodyne spectrometer for planetary exploration[C]. Fourier Transform Spectroscopy. Optical Society of America, **2007**: FTuC3.
- [7] SHEINIS A I, MIERKIEWICZ E, ROESLER F, et al. Spatial heterodyne spectrometer for diffuse H- α spectroscopy[C]. SPIE, 2008, **7014**: 70140I.
- [8] FENG Yu-tao, SUN Jian, LI Yong, et al. Broad-band spatial heterodyne interferometric spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(1):48-55.
冯玉涛, 孙剑, 李勇, 等. 宽谱段空间外差干涉光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(1):48-55.
- [9] HARRIS W M, ROESLER F L, HARLANDER J, et al. Applications of reflective spatial heterodyne spectroscopy to UV exploration in the Solar System[C]. SPIE, 2004, **5488**: 887.
- [10] HARLANDER J, ENGLERT C R. Design of a real-fringe DASH interferometer for observations of thermospheric winds from a small satellite[C]. Fourier Transform Spectroscopy, Optical Society of America, **2013**: FW1D.2.
- [11] FEI Xiao-yun, FENG Yu-tao, BAI Qing-lan, et al. Real-fringe DASH interferometer for upper atmospheric wind and temperature observation: concept and simulation [C]. The International Conference on Photonics and Optical Engineering and the Annual West China Photonics Conference (icPOE 2014), The International Society for Optics and Photonics, **2015**: 94492S.
- [12] YE Song, FANG Yong-hua, HONG Jin, et al. System design of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(6): 959-964.
叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱仪系统设计[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(6): 959-964.
- [13] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

- [14] ENGLERT C R, HARLANDER J M, BROWN C M, *et al.* Spatial heterodyne spectroscopy at the naval research laboratory[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(31): F158-F163.
- [15] FENG Yu-tao, BAI Qing-lan, WANG Yong-mei, *et al.* Theory and method for designing field-widened prism of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10):1030001.
冯玉涛, 白清兰, 王咏梅, 等. 空间外差光谱仪视场展宽棱镜设计理论与方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(10): 1030001.
- [16] HARLANDER J, ENGLERT C R, CHARLES M B, *et al.* The as-built performance of the MIGHTI interferometers [C]. Light, Energy and the Environment Congress, Optical Society of America, **2016**: FTh4B.2.