

棱镜型空间外差光谱技术研究

叶松^{1,2}, 史新政¹, 李树^{1,2*}, 汪杰君^{1,2}, 王新强^{1,2}

¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

²广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 提出了一种棱镜型空间外差光谱技术设计方案。该技术将传统空间外差光谱仪中的衍射光栅替换为色散棱镜和平面反射镜,分析系统轴上光路,给出了元件参数之间的匹配关系。利用仿真软件对干涉图进行理论仿真,并分析了色散棱镜的折射率和顶角角度对光谱分辨率的影响。设计并搭建了棱镜型空间外差光谱技术验证平台,采用 635 nm 和 650 nm 波长的光源初步验证了实验平台的可行性。实验结果表明:在色散棱镜采用 BK7 玻璃(650 nm 波长下折射率为 1.51452)和顶角角度设置为 30°的条件下,得到的光谱分辨率为 1.07 nm,通过仿真计算可以得到光线的能量利用率为 94.43%。实验结果与理论仿真基本一致,验证了设计方法的可行性与科学性,为空间外差光谱技术的研究提供了一个新思路。另外,通过选用更高折射率的色散棱镜和增大顶角角度等手段,还可以进一步提高光谱分辨率。

关键词 光谱学; 空间外差光谱技术; 色散棱镜; 系统设计; 傅里叶变换光谱

中图分类号 TP731

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1130002

Study on Prism-Based Spatial Heterodyne Spectrometry

Ye Song^{1,2}, Shi Xinzheng¹, Li Shu^{1,2*}, Wang Jiejun^{1,2}, Wang Xinqiang^{1,2}

¹*School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;*

²*Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin, Guangxi 541004, China*

Abstract In this study, the design scheme for a prism-based spatial heterodyne spectrometry is presented. This technology is implemented by replacing the gratings in a traditional spatial heterodyne spectrometer with dispersion prisms and plane mirrors. Axial optical path analysis is employed to derive the matching relationship between the component parameters. A theoretical simulation of the interferogram is performed using simulation software. The influences of the refractive index and vertex angle of the dispersive prism on the spectral resolution are analyzed. The experimental platform of the prism-based spatial heterodyne spectrometry is developed to provide a preliminary verification of its feasibility at wavelengths of 635 nm and 650 nm. The experimental results show that the spectral resolution is 1.07 nm when the dispersion prism is set to BK7 glass (refractive index of 1.51452 at wavelengths of 650 nm) and the vertex angle is 30°; the simulation results show that the light energy utilization rate is 94.43%. The experimental results are consistent with the theoretical results, thereby demonstrating the feasibility and scientificity of this design scheme and providing new concepts for the study of the spatial heterodyne spectrometry. In addition, the spectral resolution can be further improved by selecting a higher-refractive-index dispersion prism and increasing the vertex angle.

Key words spectroscopy; spatial heterodyne spectrometry; dispersion prism; system design; Fourier-transform spectrum

OCIS codes 300.6300; 120.6200; 230.5480; 220.4830

收稿日期: 2019-05-29; 修回日期: 2019-07-11; 录用日期: 2019-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(41561079)、中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室研究项目、广西光电信息处理重点实验室基金(GD18104, GD18105)

* E-mail: lishu_owen@sina.com

1 引 言

在 20 世纪 70 年代,空间外差光谱技术的概念首次被提出,在 90 年代该技术获得了快速发展,并成为了一种新型的可实现超光谱分辨率的光谱技术。1971 年,Dohi 等^[1]利用全息胶片作为探测器开展空间外差光谱技术的实验研究,随后美国、加拿大纷纷投入到空间外差光谱技术研究的浪潮中。2002 年,美国成功试飞了搭载第一代中层大气羟基空间外差成像仪的航天飞机,获得的大气羟基数据与理论所得结果十分吻合^[2];加拿大航天局于 2004 年开始进行了 SHOW (Spatial Heterodyne Observation of Water)项目的研究工作^[3-4],并研制了用于监测全球 15~85 km 高度大气层水汽的近红外空间外差光谱仪,系统样机于 2017 年最终完成^[5];中国科学院安徽光学精密机械研究所于 2005 年开始对空间外差光谱技术^[6]进行研究,目前已经研制出多个波段的空间外差光谱仪,它们主要被应用于大气遥感领域^[7]。此外,中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院光电研究院等单位的研究人员也开展了空间外差光谱技术的应用研究^[8-11]。

传统的空间外差光谱仪是用两个衍射光栅代替了迈克耳孙干涉仪中的两个平面反射镜,入射光经准直分束后入射到衍射光栅,经过光栅色散后在波前形成定域干涉^[6],通过电荷耦合器件(CCD)采集干涉图,对其进行傅里叶变换获取入射光的光谱信息^[12]。空间外差光谱技术具有超光谱分辨、高通量、无运动部件等优点^[13],可在某一特定波长范围内实现极高的光谱分辨率。空间外差光谱技术以其卓越的性能被广泛应用于大气痕量气体的遥感探测以及星际介质的天文观测^[8]等领域。

现有的空间外差光谱仪多采用光栅分光的方式进行干涉调制^[8-9]。光栅元件存在多级衍射的特性,在仪器设计中通常采用一级衍射光作为干涉光束,其他级次的衍射光则被忽略。因此,采用光栅分光会存在以下两方面问题:一是光栅的多级衍射特性会降低干涉光束的能量;二是由光栅产生的其他级次的衍射光会在系统内部形成杂散光,降低干涉图像的干涉度。针对传统空间外差光谱技术中衍射光栅带来的问题,本文提出了一种采用色散棱镜分光的棱镜型空间外差光谱仪(PSHS),并对其结构原理进行了探讨,然后利用 Zemax 光学软件仿真和实验室搭建进行初步的实验验证,进一步分析了提高光谱分辨率的方法。

2 系统的构成及其工作原理

棱镜型空间外差光谱仪的光学结构如图 1 所示,色散棱镜 P1、P2 和平面反射镜 M1、M2 代替了传统空间外差光谱仪中的两个衍射光栅。光束由光阑入射,经透镜 L1 准直后入射到分束器中,分束器将准直入射光分为两束相干光,一束为反射光,一束为透射光。其中:反射光进入棱镜 P1 并在出射时发生折射,折射光束经过平面反射镜 M1 反射后返回分束器;透射光进入棱镜 P2 并在出射时发生折射,折射光束经平面反射镜 M2 反射后返回分束器。两束出射光发生干涉,形成定域干涉条纹,并由 L2、L3 透镜组成的光学成像系统成像于 CCD 探测器上,对 CCD 探测器采集到的干涉图像进行傅里叶变换就可得到光线的光谱信息。

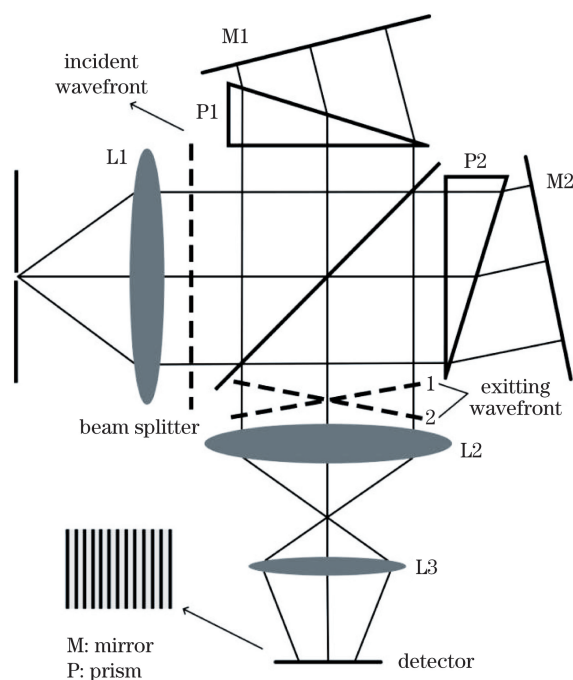


图 1 棱镜型空间外差光谱仪的结构原理图

Fig. 1 Structural schematic of PSHS

在棱镜型空间外差光谱仪中,两个色散棱镜的直角边与立方体分束器的边分别平行,平面反射镜 M1、M2 分别相对于色散棱镜以一定的倾斜角度放置。某一波长的光线经色散棱镜折射后,其传播方向会垂直于平面反射镜,经平面反射镜反射后,光线按照原光路返回,两束出射光波面与光轴垂直,此时不会产生干涉条纹,称这一波长为该棱镜型空间外差光谱仪的基准波长,基准波长下平面反射镜与光轴正交面的夹角 θ 为零频率角。当非基准波长入射到棱镜型空间外差光谱仪中时,色散棱镜对不同波

长光线的分光能力不同,导致折射角不同,从而折射光线不是垂直入射到平面反射镜,导致光线经过平面反射镜后发生角度的变化,最终两束出射光波面与光轴之间存在夹角,波面中心的光程差是零,两端的光程差最大,经过成像透镜后可以在 CCD 探测器上观察到明暗相间的干涉条纹,通过傅里叶变换即可得到待测光线的光谱信息。

棱镜型空间外差光谱仪工作在一定波长范围内,因此,基准波长的设置是仪器设计的首要问题。棱镜型空间外差光谱仪不同于传统的空间外差光谱仪,不存在光栅元件,所以不能利用光栅方程来设置基准波长。棱镜型空间外差光谱仪在基准波长下的光线追迹示意图如图 2 所示,色散棱镜 P2 的顶角角度为 α ,色散棱镜的玻璃材质根据系统设计需求进行选择(不同材质的色散玻璃主要影响光谱分辨率),根据《玻璃技术手册》确定该色散棱镜的折射率 n 与波长 λ 之间的关系。当光线从色散棱镜出射时,由折射定律

$$n \cdot \sin \alpha = \sin \gamma, \quad (1)$$

可以计算出折射角度 γ ;色散棱镜的顶角与光轴之间存在几何关系,进一步得出

$$\gamma = \alpha + \theta, \quad (2)$$

分析光轴正交面和平面反射镜之间的几何关系可以得出它们之间的夹角为 θ ,即零频率角。

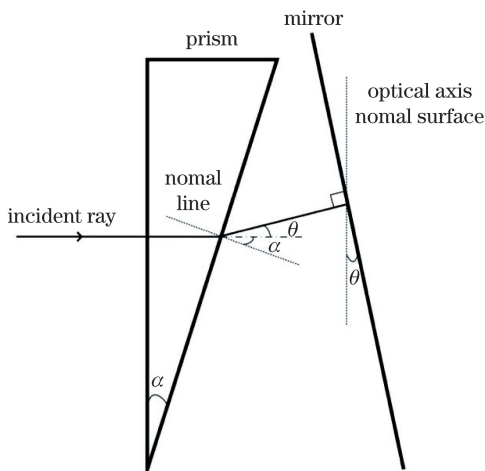


图 2 基准波长光路示意图

Fig. 2 Schematic of optical path with reference wavelength

3 模拟仿真

利用 Zemax 对系统建模,以获得干涉图样的效果图。通过 Zemax 仿真得到的光学系统模型如图 3 所示,其中主要包括的器件有矩阵光源、分束器、色散棱镜、平面反射镜以及 CCD 探测器。在仿真中,

入射光源选用具有准直特性的矩形光源,因此可以省去扩束准直装置。

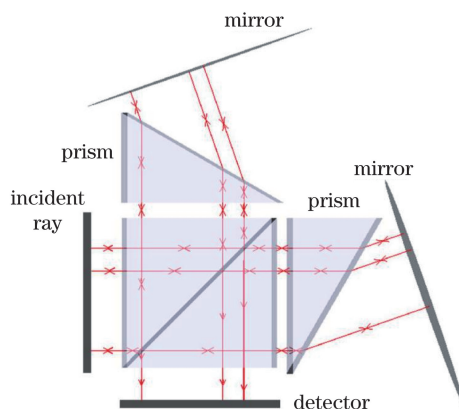


图 3 Zemax 仿真得到的棱镜型空间外差光谱仪的光路图

Fig. 3 Optical design of PSHS in Zemax simulation

Zemax 仿真设计中所使用的色散棱镜的玻璃为 BK7 玻璃,色散棱镜顶角角度 $\alpha = 30^\circ$,基准波长设置为 650 nm。Zemax 玻璃库中提供的 BK7 玻璃折射率与波长之间的公式为

$$n^2 - 1 = \frac{K_1 \lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2 \lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3 \lambda^2}{\lambda^2 - L_3}, \quad (3)$$

式中:系数 $K_1 = 1.0396, K_2 = 0.2318, K_3 = 1.0105, L_1 = 0.0060, L_2 = 0.0200, L_3 = 103.5606$ 。

通过计算可知,BK7 玻璃在基准波长下的折射率 $n = 1.514515$,光束在色散棱镜中的折射角为 $\gamma = 49.223^\circ$,零频率角 $\theta = 19.233^\circ$ 。

系统仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Configuration parameters of simulation

Parameter	Value
Wavelength of monochromatic light /nm	650, 635
Material of prism	BK7
Angle of prism /($^\circ$)	30
Size of detector /mm \times mm	7 \times 5
Pixel of detector /pixel \times pixel	1024 \times 768
Transmittance of beamsplitter	0.5
Reflectivity of mirror	1

入射光源选取 650 nm 和 635 nm 激光,其中 650 nm 光源作为基准波长光源,色散棱镜采用 BK7 材质的色散棱镜,顶角为 30° ,CCD 探测器选用 1024 pixel \times 768 pixel 的面阵探测器,每个像素大小为 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$ 。

利用 Zemax 软件的光线追迹功能,在 Detector Viewer 中观察探测器可以得到光线相干强度图。分别设置矩形光源的波长为 635 nm 和 650 nm,采集得到的干涉图如图 4 所示。

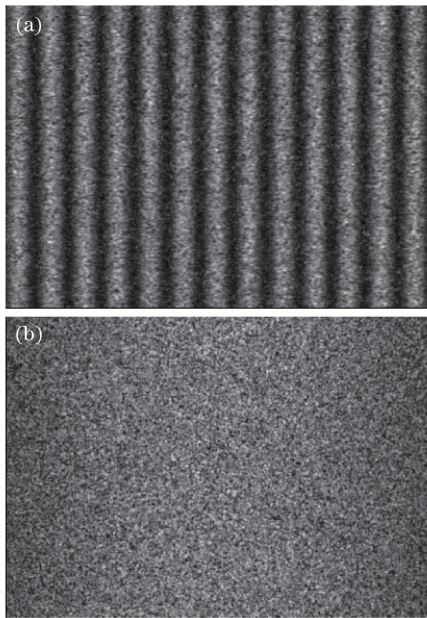


图 4 不同波长下采集得到的仿真干涉图。

(a) 635 nm 波长;(b) 650 nm 波长

Fig. 4 Simulation interferograms acquired at different wavelengths. (a) 635-nm wavelength; (b) 650-nm wavelength

通过仿真的干涉图可以看出:当入射光波长设置为 650 nm 时,干涉图近似于直流分量,没有明暗相间的干涉条纹,从而可以验证棱镜型空间外差光谱仪的基准波长设置是正确的;当入射光波长设置为 635 nm 时,得到了具有明暗相间的干涉条纹。

对两幅干涉图进行傅里叶变换,得到如图 5 所示的光谱图。在图 5 中,实线代表波长为 635 nm 的光线,虚线代表波长为 650 nm(基准波长)的光线, $B(\lambda)$ 表示入射光的光谱。其中,在横坐标上,实线峰值对应的点为 11,虚线对应于 0。通过计算可以得到光谱分辨率为 1.36 nm。

空间外差光谱仪的工作波长在以基准波长为中心的 $\Delta\lambda$ 区间内。系统的波长范围与探测器的采样点数 N 有关,满足 $N = 2\Delta\lambda / \delta\lambda$ 。在对干涉图进行傅里叶变换时,采样点数 $N = 768$,光谱分辨率 $\delta\lambda = 1.36$ nm,由此可以得出光谱范围 $\Delta\lambda = 522.24$ nm。在光谱仪的实际工作中,BK7 玻璃的最小工作波长为 310 nm,所以系统的光谱范围为 310~650 nm。当选取不同材质的色散棱镜时,光

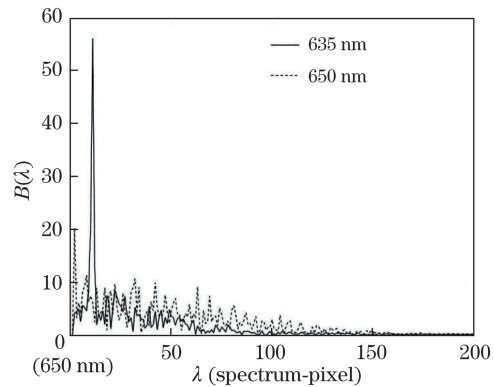


图 5 傅里叶变换光谱

Fig. 5 Fourier-transform spectra

谱范围有所改变。

在 Zemax 模型设计中,可以通过放置 CCD 探测器来测量光线通过光学元件后的光功率。为了测得棱镜型空间外差光谱仪系统的能量利用率,首先在图 3 中所示的矩形光源的后面放置 CCD 探测器,测得入射光的功率 P_{in} ,然后将探测器移到分束器后面,测得分束光线的功率 P_s ,最后将探测器放在两出射光波前,测得干涉光线的功率 P_1 。由于立方体分束器的分光特性会导致 50% 的能量按原路返回,因此在考虑系统能量利用效率时以分束光的能量为基准,可以得到能量利用率为

$$\eta = \frac{P_1}{P_s} \times 100\% \quad (4)$$

在仿真过程中,通过软件参数设置将入射光的功率定为 1 W,立方体分束器的透过率为 50%,两个平面反射镜的反射率为 1,然后测得 $P_{in} = 1$ W,经过分束器之后的两分束光皆为 $P_s = 0.49913$ W,最后测得 $P_1 = 0.47131$ W,从而得到能量利用率 $\eta = 94.43\%$ 。

目前,光栅型空间外差光谱仪的分辨率优于 0.1 nm,属于超光谱范围。在整个可见-近红外波段,光栅的一级衍射效率大于 40%,闪耀波长的一级衍射效率大于 75%^[14]。通过对棱镜型空间外差光谱系统进行仿真,测得光谱分辨率优于 1.36 nm,能量利用率大于 94.43%。仿真时采用的是普通折射率棱镜,若选用高折射率棱镜和增大棱镜顶角角度,则可以进一步提高光谱分辨率,光谱分辨率可优于 0.2 nm。与光栅型空间外差光谱仪相比,棱镜型空间外差光谱仪在牺牲一定光谱分辨率的情况下拓宽了仪器探测的波长范围,并提高了入射光的能量利用率,适用于对光谱分辨率要求较低的宽波段探测领域。

4 光谱分辨率的影响因素

4.1 折射率与光谱分辨率的关系

色散棱镜折射率的增大可以明显地提高光谱分辨率,色散棱镜折射率与其选用的玻璃材质有关。在 Zemax 中选取 BK7、SF2、SF18、SF59、TEO2、和 BATIO3 这 6 种不同材质的色散棱镜,设置棱镜顶角角度为 11.31° ,其他参数保持不变,仿真得到的光谱复原结果如图 6 所示,光谱分辨率如表 2 所示。

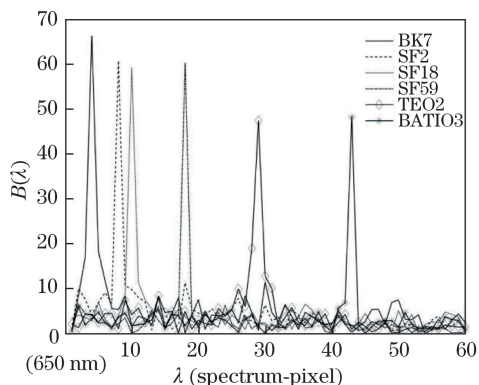


图 6 不同色散棱镜材质下的傅里叶变换光谱
Fig. 6 Fourier-transform spectra for different materials of dispersion prism

表 2 不同色散棱镜材质下的光谱分辨率
Table 2 Spectral resolutions for different materials of dispersion prism

Materials	Refractive index (650 nm)	Resolution /nm
BK7	1.51452	3.75
SF2	1.64253	1.88
SF18	1.71492	1.50
SF59	1.94028	0.83
TEO2	2.25482	0.52
BATIO3	2.39699	0.35

通过对比可以发现,随着折射率增大,光谱分辨率显著提高。

4.2 色散棱镜顶角角度与光谱分辨率的关系

在 Zemax 仿真中,选用色散棱镜材质为 BK7 的玻璃,设置色散棱镜顶角角度为 11.31° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 35° 和 40° ,其他参数保持不变,通过仿真得到的光谱复原结果如图 7 所示,光谱分辨率如表 3 所示。

根据仿真结果可以得出,通过增大色散棱镜顶角角度可以提高光谱分辨率,但和选用更高折射率的色散棱镜相比,其提高光谱分辨率的能力

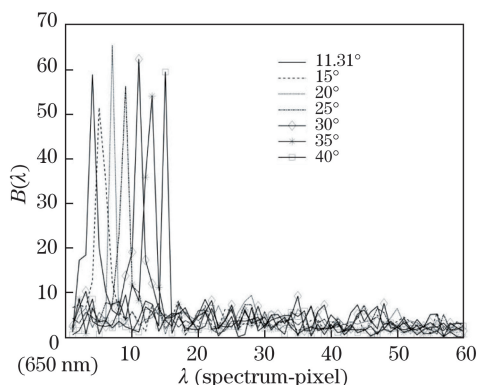


图 7 不同色散棱镜顶角角度下的傅里叶变换光谱
Fig. 7 Fourier-transform spectra for different top angles of dispersion prism

表 3 不同色散棱镜顶角下的光谱分辨率
Table 3 Spectral resolutions for different top angles of dispersion prism

Angle /($^\circ$)	Resolution /nm
11.31	3.75
15	3.00
20	2.14
25	1.67
30	1.36
35	1.15
40	1.00

较弱,并且考虑到全反射问题,色散棱镜顶角角度不可以设置得更高,从而进一步限制了光谱分辨率的提升。

5 实验验证

在实验室搭建空间外差光谱实验装置,并进行空间外差光谱实验,实验装置系统参数设计参照表 1。

采用 650 nm 波长的激光器作为光源进行基准波长的调试,固定其中的一个平面反射镜,使其与光轴正交面的夹角为零频率角 θ ,调节另外一个平面反射镜的倾斜角度,利用 CCD 探测器获取单色光干涉图。图 8 是在调整平面反射镜时干涉图样的变化情况以及对应的傅里叶变换光谱。

实验结果表明,当调节平面反射镜放置的倾斜角度时,干涉条纹的频率会发生变化。当角度调整为零频率角度时,出射波面之间的夹角为 0° ,条纹空间频率为 0,出现平场效果。

基准波长设置完成后,更换波长为 635 nm 的激光器进行实验。当非基准波长的光线入射到实

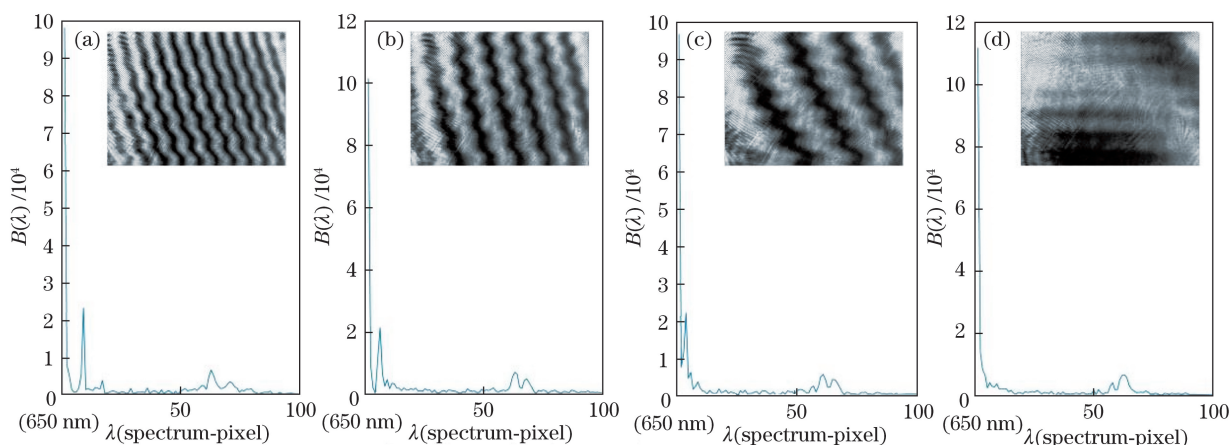


图 8 干涉图平场调制过程

Fig. 8 Modulating process of zero frequency interferogram

验装置中时,由于色散棱镜对不同波长光线的分光能力不同,导致不同光线的折射角不同,经平面镜反射回来后与入射方向产生夹角,最终出射光波面存

在夹角,干涉条纹空间频率不为零,CCD 探测器采集到的干涉条纹以及进行光谱复原后的光谱信息如图 9 所示。

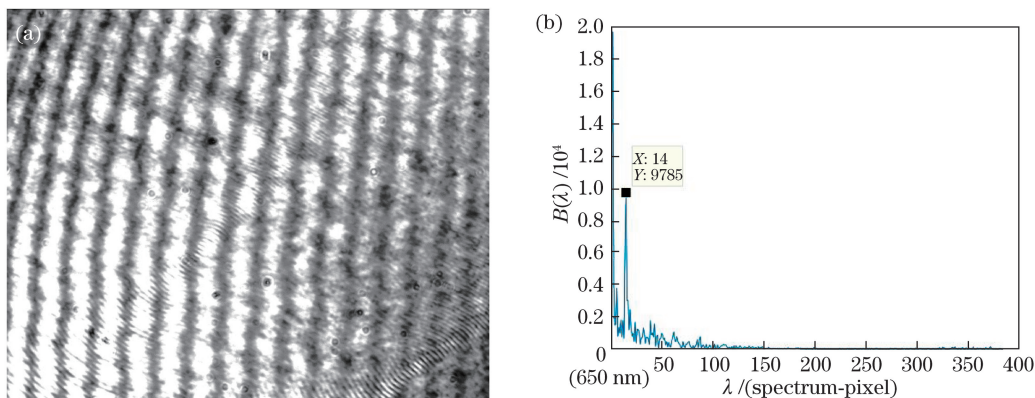


图 9 激光光谱实验结果。(a)二维干涉图;(b)傅里叶变换光谱

Fig. 9 Experimental results of laser spectrum. (a) Two-dimensional interferogram; (b) Fourier-transform spectrum

经过计算可得到光谱分辨率为 1.07 nm。实验结果与仿真结果存在误差,这是由于实验装置中的光学元件存在精度误差和装配误差,实验中采用手动旋转台调节平面反射镜的角度,会出现微小的仪器调节误差,导致实验装置系统存在整体精度误差;另外,CCD 探测器的像素尺寸是固定的,而 CCD 探测器的有效探测面积决定了能够探测到的出射光束的直径(因为实验中的光束直径比 CCD 探测器大),不同的探测面积对应了不同的出射光束直径,进而导致探测器视场内干涉条纹的个数不同,最后导致光谱分辨率不同。由于实验中所用的 CCD 探测器的尺寸是近似值,在实验中 CCD 探测器探测到的出射光束直径较大,视场中的干涉条纹数比仿真结果多,又由于像素点不变,最终导致光谱分辨率优于仿真的光谱分辨率,这使得仿真与实测的光谱分辨率

之间存在误差。在一定的误差允许范围内,实验装置的光谱分辨率与仿真结果基本一致。

6 结 论

对棱镜型空间外差光谱仪的系统结构及原理进行了讨论分析,系统采用色散棱镜代替传统空间外差光谱技术中的光栅,有效地提高了能量利用效率,利用 Zemax 仿真软件和实验室搭台的方式进行对比验证。仿真结果表明,系统的光谱分辨率为 1.36 nm,光谱范围为 310~650 nm,能量利用率为 94.43%。在实验室搭建验证装置,得到的光谱分辨率为 1.07 nm。由于验证装置在装配调试中存在精度误差和仪器误差,所以仿真结果与实测结果存在的一定误差,但误差在允许的范围,验证了本设计的科学性和有效性,为后续的研究工作建立了基础

的实验平台。棱镜型空间外差光谱仪是一套精密的干涉系统,目前的设计中还存在光谱分辨率低的问题,经过仿真验证,明确了可以采用更高折射率和更大顶角的色散棱镜来进一步提高系统的光谱分辨能力。

参 考 文 献

- [1] Dohi T, Suzuki T. Attainment of high resolution holographic Fourier transform spectroscopy[J]. Applied Optics, 1971, 10(5): 1137-1140.
- [2] Harlander J M, Roesler F L, Cardon J G, *et al.* SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth' middle atmosphere[J]. Applied Optics, 2002, 41(7): 1343-1352.
- [3] Lin Y L, Shepherd G, Solheim B, *et al.* Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development[C]//Proc. XIV Int. TOVS Study Conf., May 25-31, 2005, Beijing, China. [S.l.: s.n.], 2005.
- [4] Langille J A, Solheim B, Bourassa A, *et al.* Measurement of water vapor using an imaging field-widened spatial heterodyne spectrometer[J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4297-4308.
- [5] Langille J A, Letros D, Zawada D, *et al.* Spatial Heterodyne Observations of Water (SHOW) vapour in the upper troposphere and lower stratosphere from a high altitude aircraft: modelling and sensitivity analysis[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 209: 137-149.
- [6] Ye S, Fang Y H, Hong J, *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.
- [7] Xiong W, Shi H L, Wang Y J, *et al.* Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1511-1515.
熊伟, 施海亮, 汪元钧, 等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1511-1515.
- [8] Yin S, Feng Y T, Bai Q L, *et al.* Design of compact spatial heterodyne imaging spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(3): 0312002.
尹诗, 冯玉涛, 白清兰, 等. 紧凑型空间外差成像光谱仪设计[J]. 光子学报, 2018, 47(3): 0312002.
- [9] Cai Q S, Bin X L, Huang M, *et al.* Prototype development and field measurements of high etendue spatial heterodyne imaging spectrometer[J]. Optics Communications, 2018, 410: 403-409.
- [10] Feng Y T, Sun J, Li Y, *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.
- [11] Luo H Y, Li S, Shi H L, *et al.* Optical design of imaging system based on spatial heterodyne spectrometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 0818005.
罗海燕, 李双, 施海亮, 等. 空间外差光谱仪成像光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0818005.
- [12] Li Z G. Progress of wavefront-division Fourier transform spectrometry in the vacuum ultraviolet[J]. Chinese Optics, 2015, 8(5): 736-743.
李志刚. 真空紫外分波前傅里叶变换光谱技术进展[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 736-743.
- [13] Wang X Q, Wang H, Ye S, *et al.* Potassium spectrum detection and extraction based on spatial heterodyne[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 0117002.
王新强, 王欢, 叶松, 等. 基于空间外差的钾盐光谱探测与提取研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0117002.
- [14] Liu Q, Wu J H, Guo P L, *et al.* Fabrication of convex blazed grating with high diffraction efficiency [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0313001.
刘全, 吴建宏, 郭培亮, 等. 高衍射效率凸面闪耀光栅的研制[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0313001.