

文章编号 1004-924X(2015)01-0048-08

宽谱段空间外差干涉光谱仪

冯玉涛^{1*}, 孙 剑¹, 李 勇¹, 王姝娜², 白清兰¹

- (1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 中国科学院光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘要:研究了基于中阶梯光栅多级衍射特性实现谱段展宽的宽谱段空间外差干涉光谱仪的基础理论和系统设计方法。阐述了宽谱段空间外差干涉光谱仪的特点,分析了仪器性能指标(光谱分辨率、光谱范围、视场、信噪比、衍射级次等)与初始光学和电子学参数(光栅、视场棱镜、成像系统、探测器等)之间的理论关系。然后,设计并搭建了宽谱段空间外差干涉光谱仪实验平台,该系统的理论光谱分辨率为 $0.173 \text{ cm}^{-1}@16\,950 \text{ cm}^{-1}$,光谱区为 $500\sim 700 \text{ nm}$ 。最后,给出了激光(543.5 nm 、 632.8 nm)、Na 灯(589 nm 、 589.6 nm)、Hg 灯(576.96 nm 、 579.07 nm)光源的宽谱段实验结果,其复原光谱的平均波数采样间隔为 0.17 cm^{-1} ;光谱复原过程中采用三角切趾函数,平均光谱分辨率为 0.39 cm^{-1} 。实验结果与理论设计符合良好,且复原谱各级次之间的对应关系与光栅方程确定的理论关系完全符合。

关键词:空间外差干涉光谱仪;中阶梯光栅;多级衍射;二维干涉图

中图分类号:TH744.1;TH744.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0048

Broad-band spatial heterodyne interferometric spectrometer

FENG Yu-tao^{1*}, SUN Jian¹, LI Yong¹, WANG Shu-na², BAI Qing-lan²

- (1. Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
 2. College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)
- * Corresponding author, E-mail: fytciom@opt.ac.cn

Abstract: The basic theory and design method of a broad-band spatial heterodyne interferometric spectrometer was researched based on the multi-order diffraction of echelle grating. The characteristics of the heterodyne interferometric spectrometer was described and the relationships between the instrument performance parameters (such as spectral resolution, spectral range, signal-to-noise ratio, field of view, and diffraction order) and the initial optical and electronic parameters (such as echelle grating, field prism, imaging system and detector) were discussed. Then, an experimental platform for the broad-band spatial heterodyne spectrometer was settled to demonstrate the above discussions. The designed spectral resolution is $0.173 \text{ cm}^{-1}@16\,950 \text{ cm}^{-1}$, and the spectral range is 500 nm to 700 nm . The broad-band results were given with a laser source (543.5 nm , 632.8 nm), a sodium lamp (589 nm , 589.6 nm) and a mercury lamp (576.96 nm , 579.07 nm). It shows that the

收稿日期:2014-03-31;修订日期:2014-05-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41005019);中科院“西部之光”人才基金资助项目(No. Y129281213);国家 863 高技术研究发展计划资助项目

average wavenumber sampling interval of recovered spectra is 0.17 cm^{-1} . When the triangle apodization is used in the process of spectral recovery, the measured spectral resolution is 0.39 cm^{-1} . The obtained results conform to theoretical results and the relationship among orders of recovered spectrum accords with the theory results decided by grating function.

Key words: spatial heterodyne interferometric spectroscopy; echelle grating; multi-order diffraction; two dimensional interferogram

1 引言

空间外差干涉光谱技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种高光谱分辨率傅里叶变换光谱技术。与 Michelson 干涉仪和 Fabry-Perot 干涉仪相比,空间外差光谱仪无运动部件、对元件工艺要求低,同时具备傅里叶变换光谱仪高通量的优点^[1-2],因此广泛应用于星际介质辐射探测、实验室天体物理学观测、大气微量成分探测等微弱拓展目标的观测^[3-5]。传统空间外差干涉光谱仪由于存在光谱分辨能力(一般大于 10^4)与有限采样点数($\sim 10^3$)之间的矛盾,其光谱范围较窄(约几纳米),从而极大地限制了单台仪器的探测能力和应用范围。因此开展宽谱段空间外差干涉光谱技术的研究对提升仪器效能具有现实意义^[6-8]。

目前,空间外差干涉光谱仪的谱段展宽主要有两条技术途径:第一种是将等腰三角形刻槽的双向闪耀光栅同时作为色散和分光元件,并利用一块平面反射镜和屋脊反射镜实现三角共路式光学系统结构,通过精密控制两反射镜的旋转角实现系统 Littrow 波长步进式扫描,从而实现谱段拓展^[9];第二种是以中阶梯光栅代替传统的闪耀光栅,利用中阶梯光栅的多级衍射实现多级次差分干涉,获得系统的谱段展宽^[10]。前者的技术原理与传统的空间外差光谱仪完全相同,其优点在于干涉仪系统均为反射元件,谱段拓展未带来色差校正问题,但不易实现干涉仪视场展宽,且存在运动部件,对精密控制技术和稳定性的要求严格。后者在技术原理和干涉仪设计上都与传统的空间外差干涉光谱仪有很大的不同。为消除多级衍射带来的附加影响,干涉仪需采用二维干涉调制和级次选掩模;为消除谱段展宽带来的色差影响,视场展宽需采用消色差棱镜,光谱复原方法也有很大不同。利用多级衍射实现谱段拓展的思想最早由 Harlander 提出,2008 年 James E. Lawler 从光学系统设计和像差角度对该技术做了较为全面的

研究^[11],但研究尚未涉及各衍射级次之间的对应关系。

本文首先阐述了宽谱段空间外差干涉光谱仪的特点,然后从系统设计角度梳理了其性能指标与光栅、视场棱镜、成像系统、探测器等部件参数的理论关系,最后通过实验验证了系统光谱分辨率、各级次 Littrow 波长、光谱范围与理论设计的符合性,讨论了各衍射级次之间的对应关系,为已有的研究工作进行了补充。

2 谱段展宽理论及问题

空间外差干涉光谱仪的基本形式如图 1 所示,图中用两块闪耀光栅代替 Michelson 干涉仪两干涉臂的平面反射镜。光栅放置角度使轴上光束以 Littrow 角 θ_L 入射到光栅工作面,对于同一入射波前,在干涉仪出口存在两个交叉夹角为 2γ 的出射波前,相干产生 Fizeau 型干涉条纹。两臂光栅方程如下:

$$[\sin \theta_L + \sin(\theta_L \pm \gamma)]/D = m/\sigma, \quad (1)$$

式中: D 为光栅刻线密度, m 为衍射级次。轴上光束某一波长单色光满足 Littrow 自准直条件,对应两出射波前夹角为零(即 $2\gamma=0$),该波长称为 Littrow 波数或差分波数 σ_0 ,用频率表示。一阶近似情况下,任一波数两出射波前的夹角表示为 $2\gamma=4\tan \theta_L(\sigma-\sigma_0)/\sigma$,系统得到的干涉图与入射光谱间的傅里叶变换关系为:

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

对干涉图进行傅里叶逆变换就可以得到 $\sigma_0 \pm \Delta\sigma$ 光谱范围内的复原光谱 $B(\sigma)$ 。

传统空间外差干涉光谱仪的光谱范围窄主要有两方面原因:第一,式(2)所示的光谱图与干涉图互为傅里叶变换关系是在式(1)求解 γ 时一阶角度近似条件下成立的,即经光栅色散后的出射光束要在 Littrow 方向的小角度范围内。而普通

的平面闪耀光栅多用在 1 级,其角色散率大,因此仅在 Littrow 波数附近的小光谱范围内光束满足上述条件;第二,由于空间外差干涉光谱仪的光谱分辨率极高,一般 $R \in (10^4, 10^6)$,而探测器规格多为几百到几千个像元,数据采样点数有限,直接限制了系统的光谱范围。例如,探测器像元为 1 024,系统光谱分辨能力 $R = 5 \times 10^4 @ 590 \text{ nm}$,则光谱范围约为 12 nm;而当 $R = 5 \times 10^5 @ 590 \text{ nm}$ 时,光谱范围约为 1.2 nm。可见高光谱分辨率下,有限采样点数和光谱范围是相互制约的。

宽谱段空间外差干涉光谱仪采用中阶梯光栅替代传统窄谱段空间外差干涉光谱仪中的平面闪耀光栅,借助中阶梯光栅的多级衍射特性来实现谱段拓展。中阶梯光栅是一种低刻线密度(几十线每毫米)、大闪耀角的闪耀光栅。与传统的闪耀光栅相比,中阶梯光栅依靠高色散级次实现高光谱分辨率,一般工作在几十到几百级,每个衍射级次的自由光谱范围较窄,多个工作级次在闪耀方向上均具有高的衍射效率。基于上述特性,宽谱段空间外差干涉光谱仪系统的光轴方向上存在一系列对应不同级次的 Littrow 波数 σ_m ,每个级次在 σ_m 附近小的光谱范围内都满足差分干涉条件,可以获得自由光谱范围内的复原光谱,这样利用多个衍射级次就可以实现宽光谱范围内的目标光谱探测,达到提高仪器探测能力和应用范围的目的。

宽谱段空间外差干涉光谱仪与传统窄谱段空间外差干涉光谱仪分别如图 1、图 2 所示,它们之间有 3 点不同:

(1)像中阶梯光栅光谱仪设计交叉色散分离不同衍射级次的光谱一样,宽谱段空间外差干涉光谱仪需要采用二维干涉调制分离不同衍射级次的复原光谱。若仍采用一维干涉调制,不同级次的复原光谱会混叠在一起。二维干涉调制时将两臂的中阶梯光栅绕图 2 所示的 x 轴分别旋转 $\pm \alpha$,干涉仪出口处两臂出射波前沿垂直主截面方向形成 4α 的夹角,此时系统干涉图与光谱图的傅里叶变换关系变为:

$$I(x, y) = \int_0^\infty B(\sigma) \cdot [1 + \cos(2\pi(4(\sigma - \sigma_m)x \tan \theta_L + 4\sigma y \alpha))] d\sigma \quad (3)$$

由式(3)可见,不同级次的入射光谱除沿色散方向存在差分干涉调制外,还沿垂直色散方向存在直接与波数相关的干涉调制。对式(3)所示的二维干涉图进行二维傅里叶变换即可获得级次分

离的二维复原光谱。

(2)由于中阶梯光栅每个衍射级次的光谱范围很窄,不同级次之间的色散角度也很小,因此在干涉仪出口存在来自两干涉臂的相同波长不同衍射级次的出射波前,它们也满足相干条件,这给系统带来了附加的干扰。而传统窄谱段空间外差干涉光谱仪采用普通平面闪耀光栅,且一般用在 1 级,自由光谱范围和角色散大,因此不存在上述问题。为消除不同衍射级次相干带来的干扰,宽谱段空间外差干涉光谱仪系统在成像镜 L_2 焦面处放置了级次选择掩模,以剔除干涉级次。

(3)宽谱段空间外差干涉光谱仪系统必须采用消色差棱镜实现视场展宽。系统在宽光谱范围内工作,不能忽略色差影响,在实现视场展宽的同时必须消除色差的影响,使整个光谱范围内各级次的光束具有相同或相近的干涉特性。

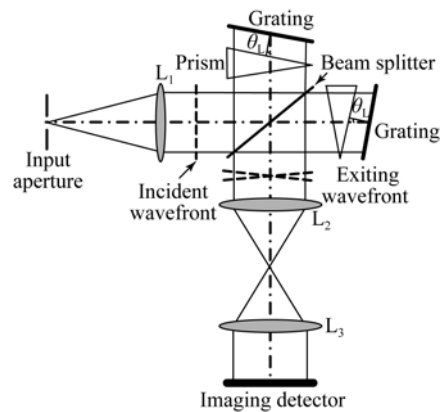


图 1 窄谱段空间外差干涉光谱仪示意图

Fig. 1 Schematic of narrow-band spatial heterodyne spectrometer

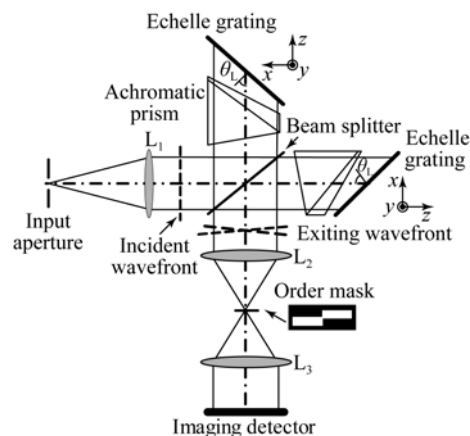


图 2 宽谱段空间外差干涉光谱仪示意图

Fig. 2 Schematic of broad-band spatial heterodyne spectrometer

3 系统参数设计

宽谱段空间外差干涉光谱仪系统的性能指标主要包括光谱分辨率、光谱范围、观测视场、信噪比、数据量等指标,工程应用中还会对体积、质量和功耗提出要求。这些主要的性能指标直接决定了仪器各组成部分的光学、电子学参数的选取。

3.1 光谱分辨率

宽谱段空间外差干涉光谱系统的光谱分辨率由沿色散方向干涉图的最大光程差决定,即沿图 2 所示 x 方向的最大光程差决定, $\delta\sigma = 1/(2X_{\max})^{[12]}$ 。与传统空间外差光谱仪相同, $\delta\sigma$ 具体表示为:

$$\delta\sigma = 1/(4W_x \sin \theta_L), \quad (4)$$

式中: W_x 为 x 方向光栅的有效尺寸,满足 $W_x = W \cos \theta_L = N_x d_{\text{pix}}/M$ 。其中 W 为光栅的有效尺寸, N_x 为探测器 x 方向的像元数, d_{pix} 为探测器的像元尺寸, $M = f'_3/f'_2$ 为成像系统的放大率。可见,系统的光谱分辨率直接影响着光栅 Littrow 角、探测器规格和条纹成像系统焦距的选择。

为分离不同衍射级次的复原光谱,沿垂直色散方向(y 向)的光谱分辨率也应满足一定要求,至少要使相邻两级次 Littrow 波数分离大于彼此之间的波数间隔。根据中阶梯光栅的衍射特性可知,相邻两级次之间闪耀波长的波数间隔可以表示为: $\alpha_1 = D/(2\sin \theta_L)$ 。则有如下关系:

$$1/(4\alpha W_y) \leq D/(2\sin \theta_L), \quad (5)$$

式中: W_y 为 y 方向光栅的有效尺寸,满足 $W_y = N_y d_{\text{pix}}/M$ 。其中 W_y 为探测器 y 方向的像元数。可见在光栅、探测器和成像系统参数都确定的情况下,中阶梯光栅绕 x 轴的旋转角度决定了级次的分离程度。

3.2 光谱范围

根据采样定理,每个级次内若能够获得 $\pm \Delta\sigma$ 的光谱范围,至少满足两个条件:(1)光程差采样的空间频率大于等于最大波数,即 $M/d_{\text{pix}} \geq \Delta\sigma$; (2)充足的光程差采样点数,即 $N_x \geq 2\Delta\sigma/\delta\sigma$ 。对于差分干涉光谱仪,第一个条件很容易满足,因此关键在于选取像元数足够的探测器。

系统可达到的最大衍射级次由 y 方向的采样点数决定: $m_{\max} \leq N_y/4$ 。

实际仪器设计时应根据应用光谱 $\sigma_1 \sim \sigma_2$ 选择合适的探测器规格参数 d_{pix} , N_x , N_y ,在满足光谱分辨率的同时使 $\sum(\sigma_{0m} \pm \Delta\sigma)$ 大于 $\sigma_1 \sim \sigma_2$ 。

3.3 视场

宽谱段空间外差干涉光谱仪也存在光谱分辨率能力 R 与极限视场 Ω_{\max} 间相互制约的关系,即 $R\Omega_{\max} = 2\pi$ 。由于宽光谱范围带来色差问题,视场展宽棱镜需要采用复合棱镜,在增大系统视场的同时,通过复合棱镜的消色差作用使各衍射级次轴上的光束以 Littrow 角入射到光栅上。根据系统的光谱范围、主波长、工作波长选定复合棱镜的两种消色差材料,视场棱镜设计的理论与方法与传统窄谱段系统中的光楔相同,参考文献 [13] 已有详细介绍,这里不再赘述。

3.4 信噪比

信噪比 SNR 是衡量系统性能的综合评价指标,用以表征仪器对目标辐射的探测能力、噪声干扰的抑制程度、干涉或成像质量优劣^[11]。宽谱段空间外差干涉光谱仪系统输出的零级数据为二维干涉图,系统信噪比可以近似表示为:

$$\text{SNR} = N_s / \sqrt{n_s^2 + n_e^2}, \quad (6)$$

式中: N_s 为信号电子数, $n_s = N^{1/2}$ 是由信号带来的光电转换噪声, n_e 为电子学噪声。单个探测器像元得到的信号电子数由系统的光学、电子学参数直接决定:

$$N_s = \frac{\pi D_0^2 \Omega T_{\text{int}}}{4 N_x N_y h c} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \tau_0(\sigma) \eta_c(\sigma) Q(\sigma) E(\sigma) [1 + \cos(2\pi(4(\sigma - \sigma_{0m})x \tan \theta_L + 4\sigma y \alpha))] \sigma d\sigma. \quad (7)$$

式中: D_0 为光学系统的入瞳直径, Ω 为系统视场立体角, T_{int} 为探测器的积分时间, h 为普朗克常数, c 为光速, η_c 为光栅衍射效率, Q 为探测器量子效率, τ_0 为光学系统透过率,包含镜头组透过率和分束元件效率, E 为入瞳处目标的辐照度。

3.5 掩模

级次选择掩模位于成像系统 L_2 的后焦面上,它在 x, y 方向的通光尺寸由中阶梯光栅参数和干涉仪视场决定,近似存在:

$$l_x = f'_2(\text{FOV}_x + 2\gamma); l_y = f'_2 \text{FOV}_y, \quad (8)$$

式中: $\text{FOV}_x, \text{FOV}_y$ 分别为干涉仪沿主截面和垂直主截面方向的视场。

4 实验平台

本文基于货架产品参数设计并搭建了一套宽谱段空间外差干涉光谱仪的实验平台。光栅采用 Thorlab 公司的 GE1325-0363 中阶梯光栅,探测器采用 Vieworks 公司的 VH-4MG CCD,分光棱镜采用 Newport 公司的 10BC17MB.1 消偏振立方分光棱镜。实验平台的详细参数如表 1 所示。

依据上节讨论的系统性能参数与初始光学、电子学参数之间的关系,结合表 1 数据可知宽谱段空间外差干涉光谱仪实验平台可覆盖 500~700 nm 光谱,干涉仪系统工作在中阶梯光栅的 81 级至 112 级,系统理论的光谱分辨率为 0.173 cm^{-1} ,相当于在 590 nm 处光谱分辨能力约为 10^5 ,每个级次的光谱为 $\pm 86 \text{ cm}^{-1}$ 。实验平台未引入视场展宽棱镜,系统视场较小,约为 $5.3 \times 10^{-5} \text{ Sr}$,但已满足实验需求。实验平台如图 3 所示。

表 1 实验平台参数

Tab.1 Parameters of experimental breadboard

部件名称	参数	量值	备注
光栅	刻线密度 $D/(\text{gr} \cdot \text{mm}^{-1})$	31.6	
	闪耀角/ $^\circ$	63	
	尺寸/mm	25.4×12.5	
	倾斜角/ $^\circ$	0.44	
分光棱镜	光谱范围/nm	400~700	
	分光比	1:1	
	通光尺寸/mm	25.4×25.4	
成像系统	光谱范围/nm	500~700	
	放大率	2.04	
	视场/ $^\circ$	0.165	
掩模	通光尺寸/mm	0.63×1.5	
探测器	像元尺寸/ μm	7.4	
	规格	2 048×2 048 2×2 bin	
	光谱范围/nm	400~900	

用 543.5 nm、632.8 nm 激光、Na 灯 (589 nm、589.6 nm) 和 Hg 灯 (576.96 nm、579.07 nm) 作为光源完成了宽谱段空间外差干涉光谱仪的平台验证实验(见图 3)。图 4 为两中阶梯光栅未绕图 2 中 x 轴旋转采集到的 Na 灯和 Hg 灯的干涉图。可见干涉图只存在一维干涉调

制,干涉条纹为等厚干涉直条纹。

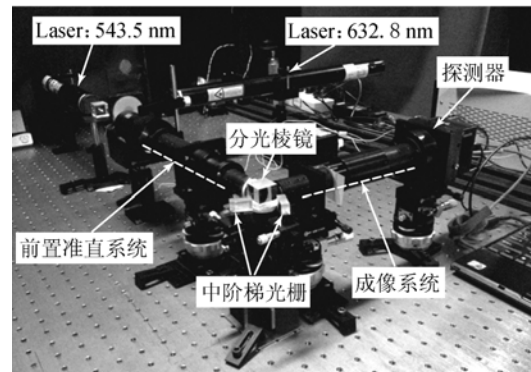
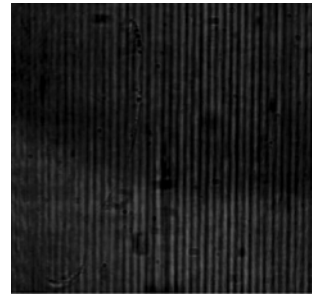


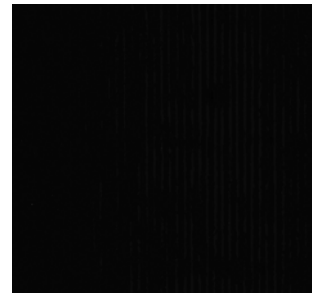
图 3 宽谱段平台实验系统

Fig. 3 Breadboard system of broad-band spatial heterodyne spectrometer



(a) 钠灯

(a) Sodium lamp



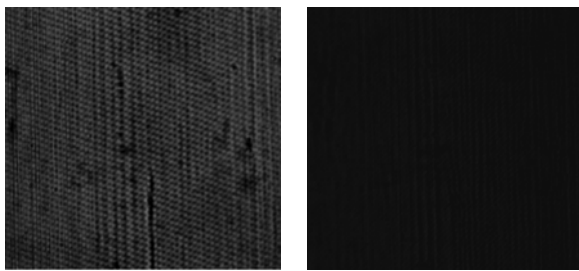
(b) 汞灯

(b) Mercury lamp

图 4 (a) 钠灯和(b)汞灯一维干涉图

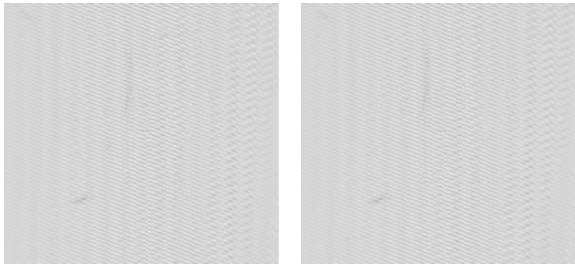
Fig. 4 One dimensional interferograms of sodium lamp and mercury lamp

图 5 所示为两中阶梯光栅绕图 2 中 x 轴分别旋转 $\pm 0.44^\circ$ 情况下,探测器采集到的原始干涉图和预处理后的局部放大干涉图。图 5(a) 中竖直线纹为光栅刻线在探测器上的成像,是对干涉图的一种干扰,经平场处理可以去除,如图 5(b) 所示。图 6 所示为对应图 5 的钠灯和汞灯的复原光谱。



(a)原始干涉图

(a) Raw interferograms



(b) 预处理后干涉图

(b) Preprocessed interferograms

图 5 钠灯和汞灯的二维原始干涉图与预处理后干涉图

Fig. 5 Two dimensional raw and preprocessed interferograms of sodium lamp and mercury lamp

图 6 横轴为差分波数决定的光谱位置,纵轴为衍射级次,像元(513,513)对应零频。根据傅里叶变换偶函数特性,分析时取纵轴大于或小于 513 的一半级次空间即可。所以钠灯和汞灯共 4 条谱线对应的复原谱位置分别为 589 nm(587, 885)、589.6 nm(486, 885)、576.96 nm(594, 893)、579.07 nm(221, 893)。根据钠灯或汞灯两条复原谱线的位置 N_1, N_2 , 计算出光谱采样间隔和该级次的 Littrow 波长为:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{N_1 - N_2}, \sigma_{Lm} = \sigma_1 - \Delta\sigma \cdot N_1. \quad (9)$$

计算结果如表 2 所示。

表 2 复原谱线确定的级次 Littrow 波长

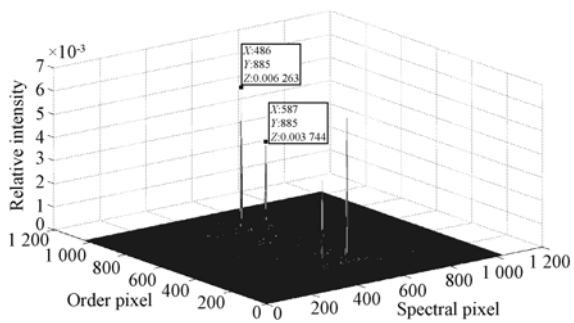
Tab. 2 Littrow wavelengths derived from recovered spectra

	光谱采样 间隔/ cm^{-1}	光谱分辨率	Littrow 波数/ cm^{-1}	Littrow 波长/nm
钠灯	0.171		16 965.27	589.439
汞灯		0.169 3	17 318.5	577.416 9

根据光栅参数可知钠灯谱线和汞灯谱线应分别处于 96 级和 98 级。表 2 中两级次 Littrow 波长满足: $589.439 \times 96 = 56\,586.144, 577.417 \times 98 = 56\,586.866$, 相对误差小于 0.002%, 满足光栅方程确定的中阶梯光栅级次之间的关系。96 级和 98 级沿纵轴方向分离 8 个像元, 相邻两级次之间分开 4 个像元, 由此可知级次分离光谱的分辨率为 44.1925 cm^{-1} , 光栅倾斜角为 0.4406° , 上述实验结果与理论值相符。

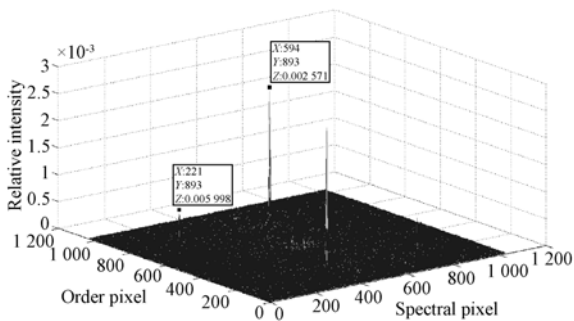
由表 2 可知, 实验平台的真实工作 Littrow 角为 63.388° , 该实验条件下系统的理论光谱分辨率为 0.1686 cm^{-1} , 实测的平均光谱采样间隔为 0.17 cm^{-1} , 与理论相符。

图 7 所示为规划后的钠灯和汞灯的复原光谱曲线。从图中可以看出, 按照半高宽标准衡量实验平台的光谱分辨率约为 2.3 个光谱采样间隔, 约为 0.3913 cm^{-1} 。首先由于条纹成像系统实际放大率与设计值的差异, 导致光谱采样间隔 (0.17 cm^{-1}) 与理论值 (0.1686 cm^{-1}) 存在误差; 其次光谱复原过程中采用了三角切趾函数, 致使理论光谱分辨率降低一半, 即理论的光谱分辨率变为 $0.1686 \times 2 = 0.3372$; 另外, 由于干涉图的调制度低, 噪声对离散采样带来影响, 使谱线半高宽大于两倍的光谱采样间隔。



(a)钠灯

(a) Sodium lamp



(b)汞灯

(b) Mercury lamp

图 6 二维复原光谱

Fig. 6 Recovered two dimensional spectra

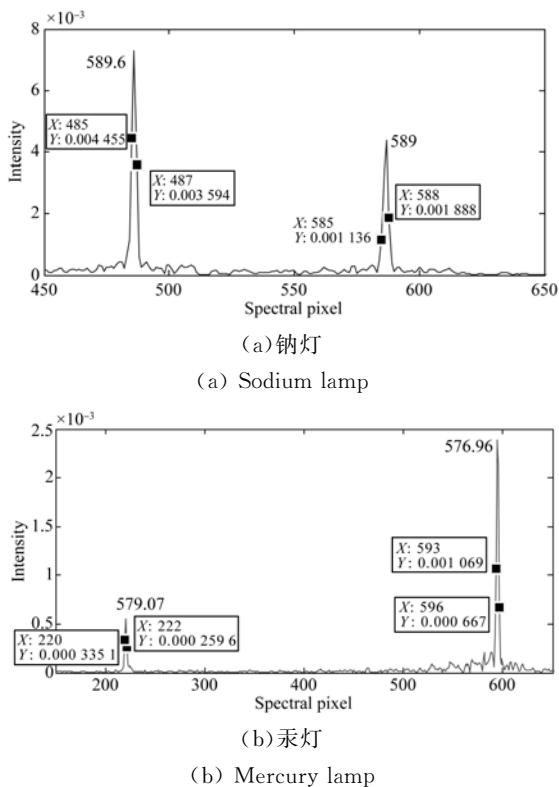


图 7 钠灯和汞灯复原光谱曲线

Fig. 7 Recovered spectra of sodium lamp and mercury lamp

为验证实验平台的宽谱段覆盖能力,将 543.5 nm 和 632.8 nm 激光同时引入系统中(如图 2 所示),复原光谱结果如图 8 所示。543.5 nm (671,917)、632.8 nm(974,861)分别处于 104 级和 89 级,相邻两级次之间分开 3.73 个像元,按钠灯确定的实验平台参数计算出两级次的光谱采样

参考文献:

- [1] JOHN M H, FRED L R, CHRISTOPH R E. Spatial heterodyne spectroscopy for high spectral resolution space-based remote sensing [J]. *Optics & Photonics News*, 2004: 1-46.
- [2] FRED L R. An overview of the SHS technique and applications [C]. OSA/FTS, Santa Fe, United States of America, 2007, FTuC1: 1-3.
- [3] WATCHORN S, FRED L R, JOHN M H. Development of the spatial heterodyne spectrometer for VUV remote sensing of the interstellar medium [J]. *SPIE*, 2001, 4498: 284-296.
- [4] 赵敏杰,司福祺,江宇. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的实验室定标 [J]. *光学 精密工程*, 2013,

间隔分别为 0.1749 cm^{-1} 和 0.1755 cm^{-1} , 级次间的干涉一致性很好。与钠灯、汞灯实验结果的差异主要是由实验平台的稳定性差造成的,但不影响对理论的验证。

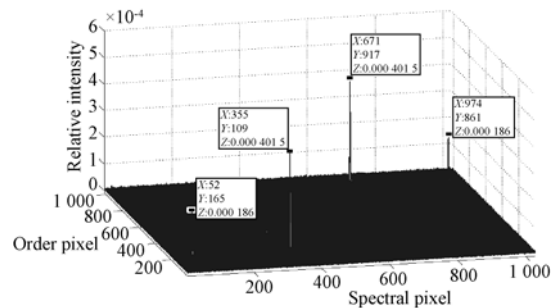


图 8 543.5 nm 和 632.8 nm 激光的复原光谱

Fig. 8 Recovered spectra for 543.5 nm and 632.8 nm lasers

5 结 论

本文详细介绍了基于中阶梯光栅多级衍射特性实现谱段展宽的宽谱段空间外差干涉光谱仪的基础理论和设计方法,分析了光谱分辨率、光谱范围、视场、信噪比、衍射级次分离等与光栅、视场棱镜、成像系统、探测器参数之间的理论关系,设计了宽谱段空间外差干涉光谱仪实验平台并进行了理论验证。实验结果表明:激光(543.5 nm、632.8 nm)、Na 灯(589 nm、589.6 nm)、Hg 灯(576.96 nm、579.07 nm)光源的实测平均光谱分辨率为 0.39 cm^{-1} 。实验结果与理论设计符合良好,得到的实验数据说明了复原谱各级次之间的对应关系。

21(3): 567-574.

ZHAO M J, SI F Q, JIANG Y. In-lab calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 567-574. (in Chinese)

- [5] LAWLER J E, LABBY Z E, FRED L R. A spatial heterodyne spectrometer for laboratory astrophysics first interferogram [C]. NASA Law, Houston, United States of America, 2006: 115-119.

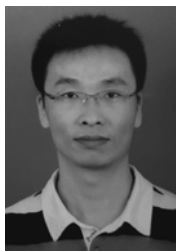
- [6] JOHN M H, FRED L R, JOEL G C. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of earth's middle atmosphere [J]. *Applied Optics*, 2001, 41(7): 1343-1352.

- [7] 郑玉权,高志良. CO₂ 探测器光学系统设计 [J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(12): 2645-2653.

ZHENG Y Q, GAO ZH L. Optical system design

- of CO₂ sounder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2645-2653. (in Chinese)
- [8] 杨勇,熊伟,叶擎昊. 空间外差光谱仪的平场波长定标实验与数据处理 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 2509-2512.
- YANG Y, XIONG W, YE Q H. Experiments of flat-field wavelength calibration of spatial heterodyne spectrometer and its data processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 2509-2512. (in Chinese)
- [9] WALTER H, OLIVIA D. A broadband spatial heterodyne spectrometer for high resolution studies of faint extended emission sources [C]. *OSA/FTS, Santa Fe, United States of America*, 2007, FTTHA6: 1-4.
- [10] JOHN M H. *Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning* [D]. Madison: University of Wisconsin, 1991: 20-110.
- [11] JAMES E L, ZAC E L, JOHN M H. Broadband, high-resolution spatial heterodyne spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(34): 6371-6384.
- [12] ROBERT J B. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* [M]. New York: Academic Press, 1972: 141-152.
- [13] 冯玉涛,白清兰,王咏梅. 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.
- FENG Y T, BAI Q L, WANG Y M. Theory and method for designing field-widen prism of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1030001. (in Chinese)

作者简介:



冯玉涛(1980—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2009年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事光谱成像技术等方面的研究。E-mail: fytciom@opt. ac. cn



孙剑(1981—),男,河南新乡人,工程师,2007年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事成像光谱仪结构设计和热力分析方面的研究。E-mail: sunjian@opt. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)