

文章编号 1004-924X(2013)10-2508-05

空间外差光谱仪的平场波长定标实验与数据处理

杨 勇^{1*}, 熊 伟², 叶擎昊¹, 孙允珠³

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 200240; 2 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
3. 上海航天技术研究院, 上海 208109)

摘要:空间外差光谱技术综合了光栅衍射与空间调制干涉两种技术特点。由于干涉仪胶合与光栅刻划过程中存在误差, 使得系统平场与理论设计值存在偏差。本文探讨了空间外差光谱仪系统平场定标的原理, 通过干涉条纹频率公式推导出了系统平场定标的基本公式, 设计了可调谐激光导入消散斑积分球定标方法及定标装置。针对中科院安徽光机所研制的用于大气 CO₂ 精细吸收光谱(1 575 nm 吸收带)探测的空间外差光谱仪样机开展了平场定标实验。定标结果表明, 仪器的实际平场波长比理论设计值向短波方向漂移了约 0.05 nm, 满足仪器设计要求。

关键词:空间外差光谱技术; 平场; 定标; 干涉频率; 数据处理

中图分类号: TP753; O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2508

Experiments of flat-field wavelength calibration of spatial heterodyne spectrometer and its data processing

YANG Yong^{1*}, XIONG Wei², YE Qing-hao¹, SUN Yun-zhu³

(1. *Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China;*
2. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,*
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3. *Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 208109, China*)
** Corresponding author, E-mail: yangyongam@foxmail.com*

Abstract: Spatial Heterodyne Spectroscopy (SHS) is a novel technology which shares the advantages of grating diffraction and spatially modulated interferometry. However, the flat-field of the system deviates its theoretical values due to the errors from interferometric gluing and grating etching. This paper explores the calibration principle of the flat-field of the system for the SHS and derives its basic formula by the interferometric fringe frequency formula. Then, it discusses the principles of zero frequency calibration and designs a new zero frequency calibration device based on an integrating sphere introduced by a tunable laser for eliminating speckles. A calibration experiment is performed on a SHS prototype for atmosphere CO₂ fine absorption spectra in Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics of the Chinese Academy of Sciences. The calibration result suggests that the instrument's zero frequency drifts 0.05 nm toward shortwave as compared to the theoretic value, which meets the design

收稿日期: 2013-04-10; 修订日期: 2013-05-28.

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划资助项目 (No. 12DZ1110100)

requirements.

Key words: Spatial Heterodyne Spectroscopy(SHS); flat field; calibration; interferographic frequency; data processing

1 引 言

空间外差光谱技术是一种近年来迅速发展起来的外差型空间干涉光谱技术。该技术的基本构造基于迈克尔逊干涉,采用平面反射镜代替了衍射光栅,具有光栅衍射与 FTS 调制的综合技术特点,在系统平场波长附近的较窄光谱范围内可以获得很高的光谱分辨率。从 20 世纪 90 年代起,美国海军、加拿大航天局等单位都在积极发展该项技术,并已成功将它应用于中高层大气环境中的 OH 自由基、星际介质、水汽等物质的探测^[1-3]。国内也开展了该项技术的研究,目前已成功将它应用于机载大气温室气体的超光谱探测^[4];某在研卫星也装载了一台基于空间外差干涉技术的监测仪,用于监测温室气体。

常见的空间调制干涉光谱仪(Sagnac 类型)^[5-7]采用阵列探测器记录干涉条纹,干涉条纹空间频率正比于波数,零波数(平场)形成零空间频率条纹。由于探测器像元数(空间频率)的限制,该类型光谱仪很难在短波处获得高的光谱分辨率。而空间外差光谱仪通过对非平场光进行光栅色散后发生干涉,形成等厚干涉条纹。由于系统平场波数形成零空间频率干涉条纹,探测器各像元得以充分利用;若将系统平场设计在感兴趣波段范围内,空间外差光谱仪则可以在任意波段内获取高分辨率光谱。

系统平场是空间外差光谱仪一项重要的性能指标参数,它不仅决定了仪器的有效光谱范围,平场波长定标还是保证仪器高精度光谱与辐射定标的前提。本文基于空间外差光谱仪系统平场的基本原理,开展了平场定标的原理、方法以及实验等方面的研究。

2 系统平场基本原理

空间外差光谱仪(Spatial Heterodyne Spectroscopy, SHS)以空间调制的方式产生两相干光束,通过改变两出射光束的波面夹角获得光程差,

从而实现干涉。干涉条纹的空间频率取决于入射光频率与一特定频率之间的频率差^[8-9]。

如图 1 所示,将具有一定立体角的光束经准直透镜 L_1 后入射到 SHS。分束器将入射光分为强度相等的两束相干光,其中一束透过分束器反射到光栅 G_1 上,经光栅 G_1 衍射后反射回到分束器上;而另一束经分束器后入射到光栅 G_2 上,并经光栅 G_2 衍射后返回分束器。两空间分解开的光束再次相遇时将发生干涉,形成频率外差干涉。

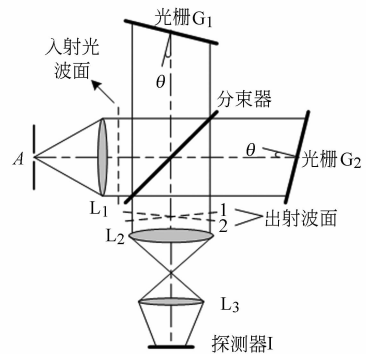


图 1 空间外差光谱仪光路原理图

Fig. 1 Principle of SHS

由光栅方程可知^[9]:

$$\sigma(\sin \theta + \sin(\theta - \gamma)) = m/d, \quad (1)$$

式中: σ 为入射光的波数, m 为光栅衍射级, θ 为光栅 Littrow 角, $1/d$ 为光栅的刻线密度。若将任意波数 σ 光束入射至仪器,在出射面上与平场波数 σ_0 光束的出射角相差 γ 角度,故 σ 波数的入射光形成的干涉条纹的空间频率函数为:

$$f_x = 2\sigma \sin \gamma \approx 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta. \quad (2)$$

若将连续光谱 $B(\sigma)$ 输入仪器,探测器在干涉维方向(x)上获取的干涉数据函数为:

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\sigma) (1 + \cos[2\pi(4(\sigma - \sigma_0)x \tan \theta)]) d\sigma. \quad (3)$$

在 SHS 中,若将光栅的位置固定不动,轴向光以 Littrow 角(θ)入射到光栅上,该波数的光将以 θ 角原方向衍射回来,因此,两波前的位相差为零,不产生干涉条纹,此时的波数称为 Littrow 波

数,所形成的场为空间外差光谱仪的系统平场。

平场波数的光入射仪器将产生平场效应(无干涉条纹),非平场波数的光入射仪器产生与频率相关的干涉条纹,如图 2 所示。

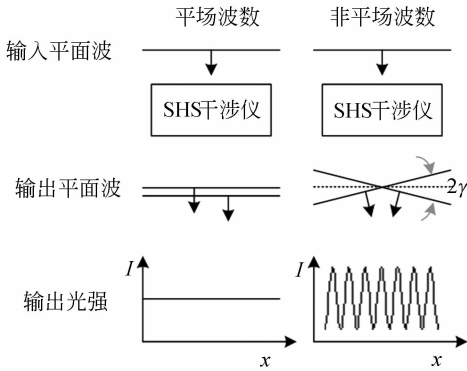


图 2 波面输出

Fig. 2 Output waves

通过以上分析以及式(19)可知,SHS 系统平场波长的大小由两方面因素决定:光栅放置的 Littrow 角以及光栅的刻线周期 d 。

3 平场定标原理与方法

用 SHS 的系统平场波长作为光谱范围的起点(或终点),将决定入射光波数经干涉仪后产生的干涉条纹频率,因此,系统平场的精确定标对分析 SHS 的光谱分辨率及光谱范围有着重要意义。理论上若将平场波数 σ_0 的光入射到 SHS 系统,经两光栅衍射后的出射光波面的夹角为 0,没有位相差,将不形成干涉调制现象,出现平场效果,探测器各像元的输出值均一致。但在实际加工和装调过程中,很难保证光学元器件面型的平整性及安放位置的精度要求,即使在平场入射光条件下也难产生平场输出,因此,不能直接采用测试平场效果的方式来确定系统平场^[10]。

由 SHS 干涉条纹频率公式可知,利用两已知波长单色光源的干涉条纹频率可以开展系统平场的定标。假设两单色光源的波长分别为 λ_1 与 λ_2 ,对应的干涉条纹数目为 f_1 与 f_2 。SHS 干涉条纹频率公式为:

$$f_x = 4(\sigma_0 - \sigma) \tan \theta, \quad (4)$$

式中: σ_0 为系统 Littrow 波数, σ 为入射光波数, θ 为 Littrow 角。波数 σ 与波长 λ 之间的关系如下:

$$\sigma = \frac{1}{\lambda}. \quad (5)$$

由已知入射光波长与干涉条纹数值等数据及干涉条纹频率公式可以推导出 SHS 的实际 Littrow 波长 λ_0 ,为:

$$\lambda_0 = \frac{f_2 - f_1}{(f_2/\lambda_1) - (f_1/\lambda_2)}. \quad (6)$$

单色光的干涉条纹数目 f 可以通过以下两种方式获取:

(1)直接测量单色光干涉图的明暗条纹数;

(2)对干涉图进行光谱复原,在频谱域来测量干涉条纹数。

SHS 系统平场定标采用可调谐激光加消散斑积分球平场定标方法。定标装置由可调谐激光器、积分球、耦合光纤、波长计以及功率计等组成,如图 3 所示。激光器用于发出较窄线宽的单色光源,利用光纤进行输出,并与积分球装置进行耦合,激光在球内进行多次漫反射后,在出口形成均匀、准朗伯性的单色面光源。此外,积分球内配置消激光散斑旋转漫反射板装置。波长计与功率计用于监测激光的输出波长及功率。平场定标时,分别采集不同波长单色光的干涉图,通过光谱复原计算干涉条纹数值,从而完成平场波长的位置定标。

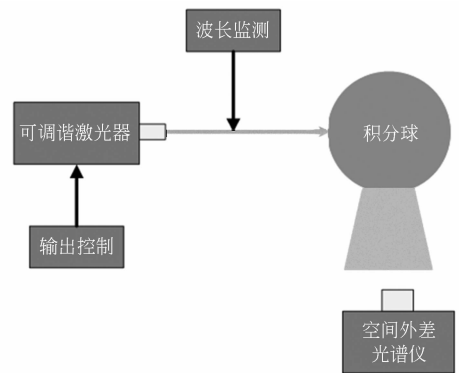


图 3 可调谐激光平场定标示意图

Fig. 3 Diagram of tunable laser zero frequency calibration

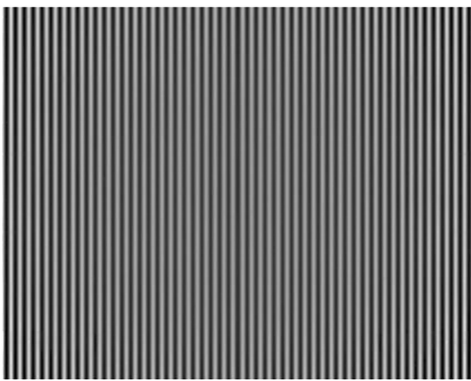
本定标装置利用可调谐激光器输出连续单色光的功能,在仪器波长范围内按一定步长采集多组单色光干涉条纹,通过相邻两波长计算一组平场波长数值,然后对多组平场波长数值求均值。这种方法能够有效消除实验过程中激光波长输出及空间外差光谱仪观测产生的随机误差,提高定标精度。

4 定标实验及数据分析

本文主要针对中科院安徽光机所研制的 SHS 样机开展平场定标实验,该样机用于大气 CO₂ 精细吸收光谱(1 575 nm 吸收带)的探测,采用面阵探测器进行干涉图数据的采集,仪器的基本性能指标设计值为:

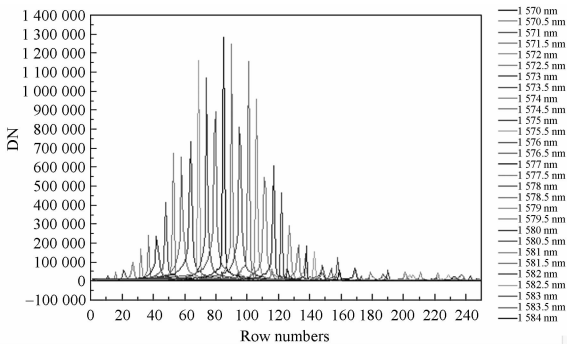
- (1)光谱: 1 569~1 584 nm;
- (2)系统平场: 1 569 nm;
- (3)光谱分辨率: 0.4 cm⁻¹ (平均波长分辨率为 0.1 nm);
- (4)视场: 6°.

可调谐激光器的波长输出精度以及稳定性可达 pm 级(1×10⁻³ nm),优于定标仪器的光谱分辨率两个数量级,能够满足平场定标的精度要求。



(a)经预处理后的 1 575 nm 单色光干涉图

(a) Interference pattern of 1 575 nm monochromatic light after pretreatment



(b)复原光谱

(b) Spectral restoration result

图 4 系统平场定标数据

Fig. 4 Measuring results of zero frequency calibration

在平场定标实验中,每隔 0.5 nm 采集一组单色光干涉数据,共采集 28 组单色光干涉图。通过干涉图预处理及光谱复原^[11]获取单色光光谱数据,在频谱域进行干涉条纹值计算。单色光干涉图及光谱复原数据如图 4 所示。

分别采用两两相近波长及干涉条纹数值来计算系统的实际平场 λ₀, 计算结果如表 1 所示。由于激光波长及仪器的稳定性问题,系统平场在不同波长测试点的计算结果有着较小的差异,将计算的多组平场数据的平均值作为仪器最终的平场大小,其结果为 1 568.95 nm。空间外差光谱仪设计的理论平场为 1 569 nm,定标结果显示,平场向短波方向漂移了约 0.05 nm。

表 1 系统平场定标数据

Tab. 1 Data of zero frequency calibration

波长 λ /nm	干涉 条纹 f	平场 λ ₀ /nm	波长 λ /nm	干涉 条纹 f	平场 λ ₀ /nm
1 570	11.05	1 568.95	1 577	85.02	1 568.96
1 570.5	15.88		1 577.5	90.01	
1 571	21.32	1 568.94	1 578	95.44	1 568.94
1 571.5	26.93		1 578.5	100.95	
1 572	32.13	1 568.95	1 579	106.08	1 568.97
1 572.5	36.83		1 579.5	111.41	
1 573	42.31	1 568.96	1580	116.85	1 568.95
1 573.5	48.05		1 580.5	122.03	
1 574	52.94	1 568.95	1581	127.15	1 568.96
1 574.5	58.07		1 581.5	132.67	
1 575	63.89	1 568.97	1 582	137.96	1 568.95
1 575.5	69.11		1 582.5	142.96	
1 576	74.05	1 568.95	1 583	148.15	1 568.96
1 576.5	79.62		1 583.5	153.76	

根据光栅方程可知,决定系统平场的是光栅放置的 Littrow 角与光栅刻线周期 d。此外,由于干涉仪在加工和光栅胶合过程中存在误差,光栅刻线周期的不准确也会造成系统平场在长波或短波方向的移动(反应在干涉图上的变化是干涉条纹数量的增减)。

5 结 论

空间外差光谱仪(SHS)的系统平场由光栅放置的 Littrow 角以及刻线周期 d 共同决定,由于在干涉仪胶合过程与光栅刻划中存在误差,使得

系统平场与理论设计值存在偏差,需通过定标来确定实际的平场波长。本文通过干涉条纹频率公式推导出了系统平场定标的基本公式,利用可调

谐激光加消散斑积分球定标设备完成了平场定标试验。定标结果表明,系统的实际平场与理论设计值存在 0.05 nm 的误差,可满足仪器设计要求。

参考文献:

- [1] HARLANDER J M, 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.
- [2] ENGLERT C R, STEVENS M H, SISKIND D E, *et al.*. Spatial heterodyne imager for mesospheric radicals on STPSat-1[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: 1-20.
- [3] LIN Y L, SHEPHERD G, SOLHEIM B, *et al.*. Introduction to Spatial Heterodyne Observations of Water (SHOW) project and its instrument development[C]. *ITSC-X Proceedings Beijing (Poster)*, China, 2005.
- [4] 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.
- 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. (in Chinese)
- [5] YARBROUGH L T S, CAUDILL T, KOUBA M E, *et al.*. Might at hyperspectral imager summary of on-orbit performance [J]. *SPIE*, 2002, 4480: 186-197.
- [6] BESTA F A, REVERCOMBA H E, BINGHAMB G E, *et al.*. Calibration of the Goestationary Imaging Fourie Transform Spectrometer (GIFTS) [J]. *SPIE*, 2001, 4151: 21-31.
- [7] 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): 43-49.
- XIANG L B, WANG ZH H, LIU X Q, *et al.*. Spatially modulated fourier transform hyperspectral imager for HJ-1A satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(6): 43-49. (in Chinese)
- [8] HARLANDER J. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning [D]. USA: *University of Wisconsin-Madison*, 1991.
- [9] 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.
- YE S, FANG Y H, HONG J, *et al.*. System design of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 959-964. (in Chinese)
- [10] ENGLERT C R, HARLANDER J M. Flat-fielding in spatial heterodyne spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45: 4583-4590.
- [11] 叶松, 熊伟, 乔延利, 等. 空间外差光谱仪干涉图数据处理[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 848-852.
- YE S, XIONG W, QIAO Y L, *et al.*. Data processing for interferogram of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(3): 848-852. (in Chinese)

作者简介:



杨勇(1983—),男,山东济宁人,工程师,2006年于山东师范大学获得学士学位,2008年于华中科技大学获得硕士学位,现为上海卫星工程研究所载荷与地面应用研究室副主任,主要从事卫星有效载荷总体设计及定标测试研究。E-mail: yangyongam@foxmail.com



熊伟(1975—),男,湖北武汉人,博士,研究员,2004年、2007年于中国科学院安徽光学精密机械研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事新型超光谱遥感技术、光谱及辐射定标等方面的研究。E-mail: frank@aiofm.ac.cn



叶擎昊(1983—),男,江苏南通人,工程师,2006年于南京理工大学获得学士学位,2009年于上海航天技术研究院获得硕士学位,主要从事星载微波、光学载荷总体设计及定标方法的研究。E-mail: sakura869852@163.com



孙允珠(1961—),女,江苏吴江人,研究员,1983年于西安电子科技大学获得学士学位,现为上海航天技术研究院科技委常委、中国航天科技集团公司学术带头人,主要从事气象与环境监测系列卫星,星载微波、光学遥感研究。E-mail: sunyunzhu@163.com