空间外差光谱仪干涉图数据处理

1. 航天信息股份有限公司数字技术研究院,北京 100097

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

3. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027

摘 要 空间外差光谱技术是一种新型的超分辨光谱技术。介绍了空间外差光谱仪的基本原理,并针对其 特点提出了干涉图数据处理的方法。首先通过一阶差分对干涉图进行去基线处理,然后使用三角函数作为 切趾函数对干涉图进行切趾,并对傅里叶变换光谱进行相位校正,最后采用已知双线光源对空间外差光谱 仪原理试验装置进行波长定标。文章以 Na 双线与 Hg 谱线进行波长定标,得到了波长定标曲线。通过以上 的方法对空间外差光谱仪干涉图数据进行处理,能有效地提高干涉图反演光谱的精度。

关键词 空间外差光谱仪;干涉图;切趾;相位校正;波长定标 中图分类号:O433 文献标识码:A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)03-0848-05

引 言

2

空间外差光谱技术 (spatial heterodyne spectroscopy, SHS)综合光栅和 FTS 技术于一体,是一种新型超分辨光谱 技术,其主要特点有^[1,2],无运动部件、高光谱分辨率、光通 量大,此外,它还有集成度高、体积小、重量小、功耗小等特 点。

从 20 世纪 90 年代起,美国、加拿大等国都积极发展空 间外差光谱技术,并应用于大气微量气体遥感^[3]以及星际暗 物质天文观测^[4,5]等方面。美国的第一代中层大气羟基空间 外差成像仪 SHIMMER^[6]已于 2002 年 8 月进行了航天飞机 试验;第二代集成化 SHIMMER 于 2007 年 3 月搭载空间试 验计划卫星(STPSat-1)升空进行全球大气探测应用研究^[7]。 加拿大发展的水汽空间外差光谱仪(SHOW)^[8]计划于 2006 年 4 月完成样机。美国于 2004 年在麦迪逊 Pine Bluff Observatory 天文台进行 PBO-SHS^[9]天文望远镜平台研制,主 要用于北美星云暗物质探测。

对光谱仪采集离散干涉图数据的处理,是获得高精度光 谱数据的关键环节之一^[10,11]。与传统的傅里叶变换光谱仪 的调制方法不同,空间外差光谱仪获取干涉图的方式为空间 外差调制,信噪比易受多种因素影响,且干扰信号的精细谱 线亦可被同时探测到。因此,对干涉图的处理,目标特征信 息提取等提出了非常高的要求。此外,因加工和调整误差, 背景及其他干扰都将使干涉图变化,需要用适当的方法和算 法对干涉图进行处理。

中国科学院安徽光机所于 2005 年开始进行空间外差光 谱技术研究工作,研制了可见光波段的实验台原理试验装 置^[12-14]。本文将结合空间外差光谱仪的基本原理,从算法上 对干涉图数据处理方法进行分析研究,并给出实验结果。

1 空间外差光谱仪

空间外差光谱仪的光学系统结构如图1所示,衍射光栅



Fig. 1 Schematic diagram of the basic SHS configuration

收稿日期: 2007-11-25, 修订日期: 2008-02-26

基金项目:国家自然科学基金项目(60678056)和"863"计划项目(2006AA12Z131)资助 作者简介:叶 松,1979年生,航天信息股份有限公司博士后 e-mail: yesongmail @sina.com GI和 G2 代替了传统 Michelson 干涉仪中的两个平面反射 镜。光束进入光阑 A, 经透镜 L1 准直后入射到分束器上, 分 束器将入射光分为强度相等的两束相干光:一束经分束器反 射后入射到光栅 GI上, 并经光栅 G1 衍射后返回分束器; 另 一束透过分束器入射到光栅 G2 上, 经光栅 G2 衍射后反射 回到分束器上。两束出射光在出射面上形成干涉条纹, 并由 光学成像系统 L2、L3 成像于探测器上。记录不同位置处的 干涉条纹函数, 并通过傅里叶变换即可恢复待测光谱曲线。

空间外差光谱仪中, 光栅固定, 与光轴正交面成 Littrow 角倾斜放置。轴向光以角入射到光栅上, 某一波数的光将以 角原方向衍射回来, 此波长称为 Littrow 波数。Littrow 波 数的光经光栅衍射后的两出射波面都与光轴垂直, 位相差为 零, 干涉条纹空间频率为零。非 Littrow 波数的光经光栅衍 射返回, 传播方向与光轴有一小的夹角 ± 。某一单色的非 Littrow 波数的两波面将有一夹角 2 , 中心的光程差为零, 两端的光程差最大。不同频率的光从光栅出射时的波面与光 轴的夹角 由光栅方程决定

$$(\sin + \sin(-)) = \frac{m}{d} \tag{1}$$

式中 为入射光的波数, m为衍射级(一般取 m = 1), 1/d为 光栅的刻线密度。任意波数 的光束与Littrow 波数。的光束 出射角相差角度 , 两光栅出射光波面相差角度为 2 , 故波 数为 的两束光干涉空间频率为

 $k = 2 \sin 4(-0) \tan$ (2) 当入射光为 B()时,所得到的干涉图为

$$I(x) = B()(1 + \cos(2 4(-0)x\tan))d \quad (3)$$

通过对干涉图 *I*(*x*) 进行傅里叶变换就可以恢复入射光的光 谱 *B*()。由(3) 式所获得的光谱是 - 。的一个函数 *B*(-。),确切地说,干涉图经傅里叶变换恢复的光谱应该为 。 ±

,其中 为光谱范围。

空间外差成像光谱仪的分辨能力取决于两干涉光束的光 程差,由图 1 可以计算得到干涉图采样的最大光程差为 *U* = 2Wsin (W 为光栅宽度),由采样定理,空间外差光谱仪的 光谱分辨极限为

$$=\frac{1}{2 U} = \frac{1}{4W\sin}$$
(4)

则仪器的光谱分辨能力为

$$R = - = 4W \sin$$
(5)

从上式可以看出,空间外差成像光谱仪的分辨能力取决于光栅的分辨能力,它等于两光栅分辨能力的总和。光栅的分辨 能力主要取决于光栅的宽度 W 与刻线密度 1/d, R_G = /W/d,即光栅总线数。光谱范围 取决于干涉图的采样密度 N

$$=\frac{N}{2}$$
 (6)

中国科学院安徽光机所于 2005 年开始进行空间外差光 谱技术研究工作,完成了可见光实验台原理试验装置的研 制,主要性能指标如下。

光栅 Littrow 波长 59 1 nm; 光栅刻线密度 600 1/mm; 光

栅口径 15 mm ×15 mm; CCD 面阵探测器: 1 024 ×1 024; 像 元尺寸为 12 µm ×12 µm; 光学成像系统 f = 100 mm, 成像 倍率 0.8 1。

本文将对该原理试验装置获取的干涉图进行数据处理分 析研究,并基于装置的实验数据进行方法验证。

2 干涉图数据处理方法

首先对干涉图进行预处理,利用一阶差分去除基线;接 着采用三角函数对干涉图进行切趾处理;然后对傅里叶变换 光谱进行相位校正;对获取的光谱还要进行波长定标;最后 获取目标光源的光谱图。

2.1 干涉图预处理

本文中的空间外差光谱仪原理试验装置为非成像系统, 采用 CCD 面阵探测器进行干涉图的采集,其中只有一维为 光谱数据,那么我们可以获得许多条同一信号的干涉图数 据,对这些数据取平均能有效地消除高频噪声。

基线是干涉系统中非常重要的参数,也是干涉图数据处 理过程中必不可少的。干涉图数据存在低频基线的干扰,这 样会导致傅里叶变换光谱中出现低频假信号。去基线的方法 很多,有多项式线性拟和去基线、一阶差分去基线、小波去 基线等^[11,15]。本文采用一阶差分对干涉图进行去基线处理。 一阶差分的作用为高通滤波,具体的做法是用干涉图的后一 点的值减去前一点的值。这种处理方法虽然简单,但在空间 外差光谱仪干涉图去基线的处理的效果很好。图 2 为 Hg 光 谱的干涉图数据采用一阶差分去基线处理的结果,从去基线 前后的傅里叶变换光谱图可以看出,去基线后的光谱图去除 了虚假的低频边缘假信号。

2.2 切趾

空间外差光谱仪获得的干涉图是在有限光程差 - L 到 + L 区间上的干涉图,意味着强制干涉图函数在此之外骤降为 零,导致干涉图在区间边缘出现尖锐的不连续性。计算还原 后的谱线有旁瓣产生,正值旁瓣往往是虚假信号的来源,而 强大的负旁瓣又常使邻近的微弱光谱信号被淹没。因此,必 须采取适当的措施抑制旁瓣,抑制旁瓣的做法通常被称作切 趾。利用切趾法来缓和边缘不连续性,即用一渐进权重函数 (切趾函数)与干涉图函数相乘。切趾又称为加窗,实际上起 到一种空间频率滤波的作用。常用的切趾函数有矩形函数、 三角函数、梯形函数、高斯窗函数等。本文选用三角函数¹⁰¹

其主要特点使旁瓣抑制力强。三角函数有效地控制了旁瓣, 消除强线附近的虚假光谱信号或掩盖掉弱信号的根源,保证 了强线附近较弱光谱线的测量。

2.3 相位校正

由于探测器采样的非对称性,导致干涉图两端不对称, 采样过程中没有包括真正的零光程差点,这样将会产生相位 误差 (k),此时的干涉图变为

$$I(x) = B(k)(1 + \cos[2 kx + (k))]dk$$
(8)



Fig 2 Eliminating baseline of Hg interferogram by first order difference
(a): 2D interferogram; (b): 1D interferogram; (c): FT spectrum of (b);
(d): Interferogram after eliminating baseline; (e): FT spectrum of (d)

其相位校正方法与传统 FTS 技术中相位校正方法基本相同。 首先对干涉图进行傅里叶变换, 求出振幅光谱

$$B(k) = \sqrt{B_{\rm r}(K)^2 + B_{\rm i}(k)^2}$$
(9)

其中 B_r(K) 表示傅里叶变换光谱强度的实部, B_i(k) 为傅里 叶变换光谱的虚部。傅里叶变换所得到的位相光谱表达式为

$$(k) = \arctan \frac{B_{i}(k)}{B_{r}(k)} = \arctan \frac{\prod_{i=1}^{L} I(x) \sin(2 kx) dx}{\prod_{i=1}^{L} I(x) \cos(2 kx) dx}$$
(10)

从而最终得到的校正光谱为

 $B(k) = B_r(k) \cos[(k)] + B_i(k) \sin[(k)]$ (11) 考虑到光栅缺陷以及干涉仪的非均匀性,空间外差光谱 仪还存在另外一种相位误差 (k, x),它与空间频率(或波 数)以及 x都有关系。这种相位误差的校正方法比较复杂, Englert 等提出了校正方法^[16],该方法主要过程如下。

首先对每一个空间频率 k 对应的相位误差 (k, x) 求其 傅里叶变换结果 G(k)

$$G(k) = \exp[-i(x, k)] \exp[i2(kx)] dk \qquad (12)$$

得到的相位校正光谱为

$$B(k) = B(k) G(k - k) dk$$
 (13)

要实现相位误差 (k) 的校正, 要求采用单色光源(可调 谐激光器), 获得每一个空间频率 k的干涉图。如果相位误差 (k, x) 随变量 x和 k 的变化缓慢, 则 G(k) 随 k 的变换也会 平缓, 因此实际应用时可以通过选择有限个数的空间频率 k 获取相位误差 (k, x), 然后进行拟和得到 (k, x) 函数。

由于实验条件有限,没有可调谐激光器光源,因此,在 相位校正的过程中,本文的实验只进行了相位误差 (k)的 校正, 而未进行 (k, x)校正。 2.4 波长定标

空间外差光谱仪恢复光谱的光谱范围及分辨率可以通过 (6)和(4)两式进行计算。然而在实际应用中,系统误差会导 致傅里叶光谱谱线频移以及展宽,使光谱范围及光谱分辨率 与理论值之间存在误差。波长定标(光谱定标)可以获取空间 外差光谱仪光谱范围及光谱分辨率的实际值。通过波长定标 得到的傅里叶变换光谱才是准确的谱线。通常情况下,采用 光谱范围内的已知单线、双线(或多线)光谱光源进行空间外 差光谱实验就可以实现波长定标。由于空间外差光谱仪的分 辨率非常高,因此在选择定标光源时一定要保证其光谱线的 精度。

本文采用 Na 双线(589.0,589.6n m)和 Hg 线(577,579 nm)对原理试验装置进行波长定标。图 3(a)为 Na 双线的空 间外差干涉光谱实验数据,(b)图为 Hg 线的空间外差干涉 光谱实验数据,对 Na 双线与 Hg 线的光谱实验结果进行拟 合得到波长定标结果(c)图。

通过波长定标,我们得到了空间外差光谱仪原理试验装置的光谱分辨率极限为0.0333 nm,光谱分辨能力极限约为17000,光谱范围为17 nm(574~591 nm)。

3 讨 论

空间外差光谱仪具有超分辨光谱探测的能力,有效的数 据处理方法能提高空间外差光谱仪的光谱反演的精度,本文 就此提出了一种简单有效的干涉图处理方法,并给出了相关 的实验结果。通过进一步的改进,该方法一定会取得理想的 光谱反演结果,为空间外差光谱仪的干涉图数据处理工作提 供帮助。





- [1] Harlander J, Roesler FL. SPIE, 1990, 1235: 622.
- [2] Roesler F L, Harlander J. SPIE, 1990, 1318: 234.
- [3] Roesler F L , Harlander J. SPIE , 1999 , 3756 : 337.
- [4] Harlander J, Roesler FL, Reynolds RJ, et al. SPIE, 1993, 2006: 139.
- [5] Watchorn S, Roesle FL, Harlander J, et al. SPIE, 2001, 4498: 284.
- [6] Harlander J, Roesler FL, Cardon J G, et al. Applied Optics, 2002, 41(7): 1343.
- $\left[\begin{array}{c} 7 \end{array} \right] \quad Harlander J \ , \ Roesler \ F \ L \ , \ Englert \ C \ R \ , \ et \ al. \ Applied \ Optics \ , \ 2003 \ , \ 42 (15) \ : \ 2829.$
- [8] Lin Yunlong, Shepherd G, Solheim B, et al. ITSC- Proceedings. 25-31 May, 2005, Beijing, China, 2005.
- [9] Mierkiewicz EJ, Roesler FL, Harlander J, et al. SPIE, 2004, 5492: 751.
- [10] Griffiths P R, de Haseth J A. Fourier Transform Infrared Spectrometry. New York: Wiley Press, 1986. 15.
- [11] LI Zhi-gang, WANG Shu-rong, LI Fu-tian(李志刚, 王淑荣, 李福田). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2000, 20(2): 203.
- [12] YE Song, FANG Yong hua, HONGJin, et al (叶 松, 方勇华, 洪 津, 等). Chinese Journal of Scientific Instrument (仪器仪表学报), 2006, 27(6) S1: 983.
- [13] YE Song, FANG Yong hua, HONG Jin, et al (叶 松, 方勇华, 洪 津, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2006, 14(6): 959.
- [14] YE Song, FANG Yong-hua, HONG Jin, et al (叶 松, 方勇华, 洪 津, 等). Opto-Electronic Engineering (光电工程), 2007, 34(5):
 84.
- [15] HAO Yong, CHEN Bin, ZHU Rui(郝 勇,陈 斌,朱 锐). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(10): 1838.
- [16] Englert C R, Harlander J, Cardon J G, et al. Applied Optics, 2004, 43(36): 6680.

Data Processing for Interferogram of Spatial Heterodyne Spectrometer

YE Song $^{1,\,3}$, XIONG Wei 2 , QIAO Yan li^2 , HONG Jin 2 , FANG Yong hua 2

1. Institute of Digital Technology, AISINO Corporation, Beijing 100097, China

2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

3. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

Abstract Spatial heterodyne spectroscopy (SHS) is a new spectroscopic technique which can achieve high spectral resolution. The basic concepts of spatial heterodyne spectrometer was described. A method of data processing for interferogram of spatial heterodyne spectrometer was presented based on its characteristics. First order difference was performed for eliminating the baseline of interferogram. The triangular function was chosen as apodization function. The process of phase correction for Fourier transform spectrum is described. The wavelength calibration curve of SHS experimental system was obtained by measuring sodium light double line and mercury light double line. The spectral inversion accuracy of spatial heterodyne spectrometer can be effectively improved by use of this method.

Keywords Spatial heterodyne spectrometer; Interferogram; Apodization; Phase correction; Wavelength calibration

(Received Nov. 25, 2007; accepted Feb. 26, 2008)

852