

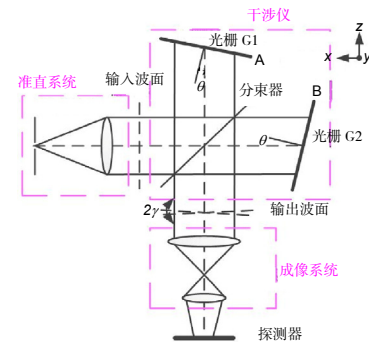
空间外差光谱仪的干涉图校正

张文理¹, 田逢春^{1*}, 赵贞贞², 张丽¹,
Yang Simon X³, 宋安¹

¹重庆大学通信工程学院, 重庆 400044;

²河南财经政法大学计算机与信息工程学院, 郑州 450000;

³圭尔夫大学工程学院, 安大略 N1G 2W1, 加拿大



摘要: 空间外差光谱技术(SHS)作为一种新型超光谱分辨率的光谱分析技术近年来得到了快速发展和广泛应用。根据SHS的基本结构和原理,本文对SHS应用系统中能对干涉图产生影响的各种干扰和畸变进行了分析,并针对这些干扰提出了一种SHS干涉图校正方案。实验结果表明,该方案不仅可以对干涉图进行有效校正,而且复原光谱能够良好地反映输入光谱信息,提高SHS的反演精度。

关键词: 空间外差光谱仪; 畸变分析; 干涉图校正; 反演精度

中图分类号: TH744.1

文献标志码: A

Interferogram correction of spatial heterodyne spectrometer

Wenli Zhang¹, Fengchun Tian^{1*}, Zhenzhen Zhao², Li Zhang¹, Simon X. Yang³ and An Song¹

¹College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; ² College of Computer and Information Engineering, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450000, China; ³ School of Engineering, University of Guelph, Ontario N1G 2W1, Canada

Abstract: Spatial heterodyne spectroscopy (SHS) has been rapidly developed and widely used in recent years as a new type of super-spectral resolution of spectrum analysis technology. According to the structure and principles of SHS, various kinds of interference and distortion of SHS application system which influence the interferogram are analyzed in this paper and a correction scheme of SHS interferogram for the suppression of the interference is proposed. Experimental results show that the proposed method can correct the interferogram effectively, and make the recovered spectrum reflect the input spectral information well and improve the inversion accuracy of the SHS.

Keywords: spatial heterodyne spectrometer; distortion analyses; interferogram correction; inversion accuracy

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.05.003

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(5): 488–497

1 引言

空间外差光谱技术(Spatial heterodyne spectroscopy, SHS)是由 Dohi 和 Susuki^[1]在 1971 提出的一种新型

高光谱分辨率的光谱分析技术。受仪器设备发展的限制,直到 1991 年 Harlander 等^[2]设计构建了第一台 SHS 样机,从而促使 SHS 技术得到迅速发展。与傅里叶光谱仪^[3]、迈克尔逊干涉仪^[4]以及法布里-珀罗干涉仪^[5]相比,SHS 无运动部件,对元器件工艺要求低,同时具备傅里叶光谱仪光通量高的优点。目前,SHS 被广泛应用于大气微量成分探测^[6]、大气层水汽检测^[7]、实

收稿日期: 2017-03-04; 收到修改稿日期: 2017-04-24

*E-mail: fengchuntian@cqu.edu.cn

验室天体物理学观测等微弱目标的识别^[8-10]。

相对于时间调制型光谱仪^[3,4]采用单元探测器对干涉数据进行分时采集, SHS 利用面阵探测器对所有干涉数据同时进行采集, 得到二维干涉图, 这样大大降低了数据采集时间, 减轻了仪器装调压力^[11,12]。但是, 该类光谱仪的信噪比易受多种因素影响, 这导致系统获得的光谱信息不够准确, 所以对于干涉图数据处理成为 SHS 研究的关键环节之一^[13,14]。针对 SHS 干涉图的校正处理, 已有一些学者分别从干涉图低频基线去除^[15]、平坦度校正^[16,17]、切趾^[18]、相位校正^[19-21]、波长定标^[22,23]以及系统误差分析^[14,24,25]等角度进行了相关研究。但这些研究一般都是从单一或某几个方面进行分析, 得到的效果并不理想, 不利于系统快速地了解掌握干涉图的校正处理方案与流程。

本文首先阐述 SHS 的基本结构、基本原理以及基本性能; 然后从 SHS 应用系统的角度出发对干涉图中可能出现的误差进行分类, 并对相应的解决方案进行汇总; 最后提出一种 SHS 干涉图校正处理方案, 并分别使用氦氖激光器和钠光灯构建 SHS 实验平台, 对实验干涉图用上述方案进行分析得到相对精确的处理结果, 从而验证了本文所提方案的有效性和优越性。

2 空间外差光谱仪

2.1 SHS 基本结构

SHS 的结构(如图 1 所示)由三部分组成: 准直系统、干涉仪和成像系统。其中, 准直系统是将光源发出的光, 经过准直透镜组变成平行光投射到干涉仪中; 干涉仪由分束器和光栅等光学元件组成, 其目的是将

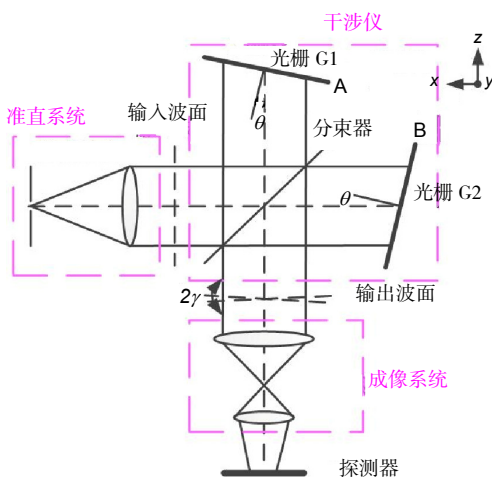


图 1 SHS 系统结构图。

Fig. 1 Structure of SHS system.

准直后的入射光经分束器和光栅衍射后, 产生干涉条纹; 光栅是将不同波长的光在空间色散开来, 从而使干涉仪在没有移动设备的情况下产生光程差; 成像系统将干涉条纹成像到探测器的感应面(CCD)上。

2.2 SHS 基本原理

SHS 用衍射光栅 G1、G2 代替迈克尔逊干涉仪中的两个平面反射镜; 输入光经过准直后入射到分束器上, 一束光经分束器反射后入射到光栅 G1 上, 并经 G1 衍射后返回; 另一束透过分束器入射到光栅 G2 上, 经 G2 衍射后返回分束器。两束返回光再次经过分束器后, 在定域面上形成干涉条纹, 并由成像系统(CCD)采集。通过记录的干涉条纹和一定的算法即可计算出光源的光谱信息。

图 1 中, z 轴为光轴, θ 为衍射光线与光轴的夹角, 不同频率的光从光栅出射时波面与光轴有一小的夹角 $\pm\gamma$, 该夹角 γ 由光栅方程决定^[2]:

$$\sigma[\sin\theta + \sin(\theta - \gamma)] = \frac{m}{d}, \quad (1)$$

式中 σ 是入射光的波数, m 是衍射级, $1/d$ 是光栅的刻槽密度。光束中若某一波数 σ_0 的光满足 Littrow 自准直条件, 即对应出射波前的夹角为零 ($2\gamma = 0$), 则该波数 σ_0 称为 Littrow 波数。其它任意波数 σ 的光束与 Littrow 波数 σ_0 的光束出射角相差角度为 γ , 两光栅出射光波的波面差为 2γ , 对式(1)中的 γ 角取一阶近似得到波数为 σ 的两束干涉光的空间频率^[2]:

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

当输入光源的谱密度函数为 $B(\sigma)$ 时, 得到系统的干涉图分布^[2]:

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

式中 x 是探测器对光栅平面上入射光色散程度的测量, 如果对系统干涉图进行逆傅里叶变换就可以得到 $\sigma_0 + \Delta\sigma$ 光谱范围内的复原光谱 $B(\sigma)$ 。

2.3 SHS 基本性能

1) 分辨极限

SHS 的分辨极限取决于沿色散方向干涉图的最大光程差, 即由图 1 中沿 x 轴方向的最大光程差 $U_{x\max}$ 决定, 而 $U_{x\max} = 4x_{\max} \tan\theta$, $x_{\max} = W \cos\theta/2$, 所以 $U_{x\max} = 2W \sin\theta$, 则 SHS 的分辨极限^[2]为

$$\delta\sigma = \frac{1}{2U_{x\max}} = \frac{1}{4W \sin\theta}, \quad (4)$$

式中: $U_{x_{\max}}$ 是系统最大光程差, W 是光栅的有效宽度, θ 是光栅的衍射角。

2) 分辨能力

根据 1) 中分析的分辨极限可得到 SHS 系统的分辨能力^[2]:

$$R = \frac{\sigma}{\delta\sigma} = 4W \sin \theta \cdot \sigma. \quad (5)$$

3) 光谱范围

SHS 的光谱范围 $\Delta\sigma$ 与傅里叶光谱仪一样, 受限于干涉图的采样点数 N , 即:

$$\Delta\sigma = \frac{N}{2} \cdot \delta\sigma. \quad (6)$$

3 空间外差光谱仪干涉图噪声与畸变分析

3.1 噪声与基线去除

噪声一直是影响光学系统性能的主要因素, 对本系统而言, 噪声主要来源于两方面: 一是系统所用设备自身存在的误差, 如透镜、分光棱镜以及光栅等器件在制造时存在的细微畸变; 二是实验环境带来的干扰, 如空气中的尘埃、实验平台的不稳定等。目前, 针对这类噪声的抑制方案有很多, 如传统的低/高/带通滤波降噪、自适应滤波降噪、基于小波^[26,27]或超小波的变换域降噪^[28,29]等。

基线的存在会导致复原光谱中出现低频假信号而影响复原光谱的正确性, 所以基线去除成为干涉图校正处理中必不可少的过程。常见的基线去除方法有多项式拟合、导数校正、小波变换校正及标准正态变换校正等, 而最简单有效的基线去除方案是用干涉图直接减去其均值即可。

3.2 平坦度校正

式(3)是理想 SHS 干涉图的表达式, 实际上由于仪器特性的畸变、光栅表面的污染以及干涉仪两臂的不平衡等都会导致干涉图出现畸变。此时, 干涉图的分布^[16]:

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(k) [t_A^2(x) + t_B^2(x) + 2\varepsilon(x, k)t_A(x)t_B(x) \cos(2\pi kx)] dk, \quad (7)$$

式中: $\varepsilon(x, k)$ 是干涉图的调制效率, $t_A^2(x)$ 和 $t_B^2(x)$ 分别是 SHS 两臂 A 和 B(见图 1)传递光信号的强度传递函数。式(7)是 SHS 干涉图的一般表达式, 理想情况下, $t_A^2(x) = t_B^2(x) = 1/4$, 而 $\varepsilon(x, k)$ 在零光程差时为 1, 且随着光程差的增大而减小。

Englert 和 Harlander 在文献[16]中对平坦度校正做了详细分析, 本文以干涉仪两臂不平衡为例进行简单描述。首先, 将式(7)拆分可得如下等式:

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(k)t_A^2(x)dk + \int_0^{\infty} B(k)t_B^2(x)dk + \int_0^{\infty} 2B(k)\varepsilon(x, k)t_A(x)t_B(x) \cos(2\pi kx)dk = I_A(x) + I_B(x) + \int_0^{\infty} 2B(k)\varepsilon(x, k)t_A(x) \cdot t_B(x) \cos(2\pi kx)dk, \quad (8)$$

式中: $I(x)$ 为干涉光强, $I_A(x)$ 和 $I_B(x)$ 分别为两臂光强。观察式(8)可以发现:

$$I_A(x) + I_B(x) = [t_A^2(x) + t_B^2(x)] \int_0^{\infty} B(k)dk = C \cdot [t_A^2(x) + t_B^2(x)]. \quad (9)$$

那么, 将式(8)两侧同时除以 $I_A(x) + I_B(x)$, 并进行移位处理得到:

$$\frac{I(x)}{I_A(x) + I_B(x)} - 1 = \frac{1}{C} \int_0^{\infty} 2B(k)\varepsilon(x, k) \frac{t_A(x)t_B(x)}{t_A^2(x) + t_B^2(x)} \cos(2\pi kx)dk. \quad (10)$$

此时, 引入修正因子:

$$\mu(x) = \frac{2\sqrt{I_A(x)I_B(x)}}{I_A(x) + I_B(x)},$$

对比式(9)会发现, 实际上 $\mu(x)$ 的值与 $2t_A(x)t_B(x)/[t_A^2(x) + t_B^2(x)]$ 的值相同。所以将式(10)左右两侧同时除以修正因子 $\mu(x)$ 就可以得到修正后的调制干涉图:

$$I_C(x) = \frac{1}{\mu(x)} \cdot \left[\frac{I(x)}{I_A(x) + I_B(x)} - 1 \right] = \frac{1}{C} \int_0^{\infty} B(k)\varepsilon(x, k) \cos(2\pi kx)dk. \quad (11)$$

3.3 切趾

由于 SHS 采集的干涉图是在有限光程差区间内得到的, 这意味着需要强制干涉函数在该区间之外骤降为零, 会导致干涉图边缘出现尖锐的不连续性。此时, 如果利用该干涉图复原光谱会有“旁瓣”产生, 而正值旁瓣往往成为虚假信号的来源, 且强大的负值旁瓣又常使邻近的微弱光谱信号被淹没。因此, 采用切趾的手段来对旁瓣进行抑制成为 SHS 干涉图校正处理的另一重要环节^[14]。

切趾又称为加窗, 对干涉图进行切趾处理, 简而言之就是将干涉图与相应的窗函数相乘, 起到一种空间滤波的作用。常见的切趾函数有三角形窗函数、梯形窗函数、矩形窗函数、Hanning 窗函数、高斯窗函

数以及 Blackman-Harris 窗函数等^[30]。以 Blackman-Harris 窗函数为例进行分析, 定义^[33]:

$$w(n) = 0.355766 - 0.487395 \cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right) + 0.144234 \cos\left(\frac{2\pi}{N}2n\right) - 0.012605 \cos\left(\frac{2\pi}{N}3n\right). \quad (12)$$

其中 $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

对应窗函数曲线如图 2 所示。

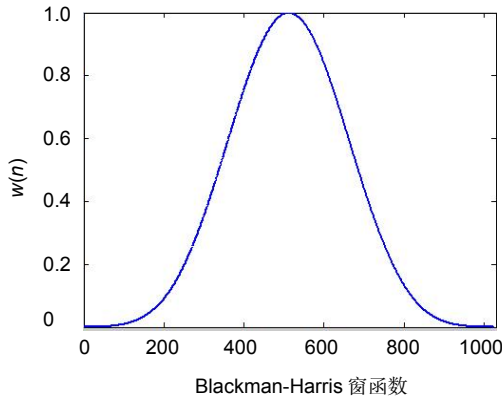


图 2 4 阶 Blackman-Harris 窗。

Fig. 2 4-order Blackman-Harris window.

Blackman-Harris 窗函数具有非常强的旁瓣抑制能力, 可以有效地对强线附近的虚假光谱信号进行消除, 以保证强线附近较弱光谱信号的检查。

3.4 相位校正

相位校正的目的是为了消除由于分束器均匀性不好、探测器光谱响应不均匀、电子线路误差以及采样步距不均匀等造成 SHS 测量到的干涉图不对称现象。此时, SHS 的干涉图分布^[19, 31, 32]:

$$I'(x) = \int_0^{\infty} B(k) \cos(2\pi kx + \Phi(k)) dk = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} B(k) \exp(-j2\pi kx - j\Phi(k)) dk + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} B(k) \exp(-j\Phi(k)) \exp(-j2\pi kx) dk. \quad (13)$$

对式(13)进行逆傅里叶变换得到此时干涉图的光谱信息:

$$B(k) \exp(-j\Phi(k)) = B'(k) = \text{Re}[IFFT(I'(x))] + j\text{Im}[IFFT(I'(x))]. \quad (14)$$

那么, 系统的相位误差:

$$\Phi(k) = -\arctan \frac{\text{Im}[IFFT(I'(x))]}{\text{Re}[IFFT(I'(x))]} \quad (15)$$

由式(14)中 $B(k) \exp(-j\Phi(k)) = B'(k)$, 得到系统的理论光谱:

$$B(k) = B'(k) \exp(j\Phi(k)). \quad (16)$$

根据卷积的基本性质: 两个函数乘积的傅里叶变换等于这两个函数分别进行傅里叶变换后的卷积。那么, 式(16)可以用下式表示:

$$B(k) = IFFT[FFT[B'(k) \exp(j\Phi(k))]] = IFFT[FFT[B'(k)] * FFT[\exp(j\Phi(k))]] = IFFT[I'(x) * FFT[\exp(j\Phi(k))]]. \quad (17)$$

不妨令:

$$M(x) = I'(x) * FFT[\exp(j\Phi(k))],$$

$$N(x) = FFT[\exp(j\Phi(k))],$$

那么 $M(x)$ 即为相位校正后的干涉图。

4 空间外差光谱仪干涉图校正处理与数据分析

4.1 SHS 实验平台与性能分析

4.1.1 SHS 实验平台

本文通过构建 SHS 实验平台进行干涉图校正处理研究, 根据研究的需要构建了两个实验平台(如图 3、4 所示)。平台 1 为氦氖激光器-SHS 平台, 其中氦氖激光器购自 Thorlab, 型号 HNL020L, 功率 2 mW; 空间滤波器购自大恒光电, 型号 GC0-0112M; 准直透镜购自大恒光电, 直径 60 mm, 焦距 300 mm; 分束器购自 Thorlab, 型号 BS013-50:50, 棱长 25.4 mm; 衍射光栅购自合肥赛洛测控有限公司, 型号 GP122, 刻槽密度 1200 l/mm, 可使用波段 300 nm ~ 1000 nm; 探测器购自佳能, 型号 Canon 600D; 控制光栅旋转与俯仰的高精度电控旋转台、角位台购自北京科盈创拓有限公司。平台 2 为钠光灯-SHS 平台, 其中钠光灯购自杭州久杭教学仪器有限公司; 聚焦透镜组采用 Canon 600D 的相机镜头, 其他设备同平台 1。

4.1.2 SHS 实验平台性能参数

实验平台中探测器(CCD)的像元个数为 1024×1024, 像元尺寸为 4.3 μm, 其他相关参数如表 1 所示。

4.2 干涉图校正处理

虽然本文设计了两个实验平台, 但干涉图的校正处理方法相同, 所以本节以平台 2 获得的干涉图为例进行分析, 具体流程如图 5 所示。

由上述流程对干涉图进行校正处理如下:

1) 分别采集干涉图光强分布 $I(x)$ 和两臂光强分布 $I_A(x)$, $I_B(x)$ (采集 A 臂光强时需用黑屏遮挡 B 臂光栅 G2);

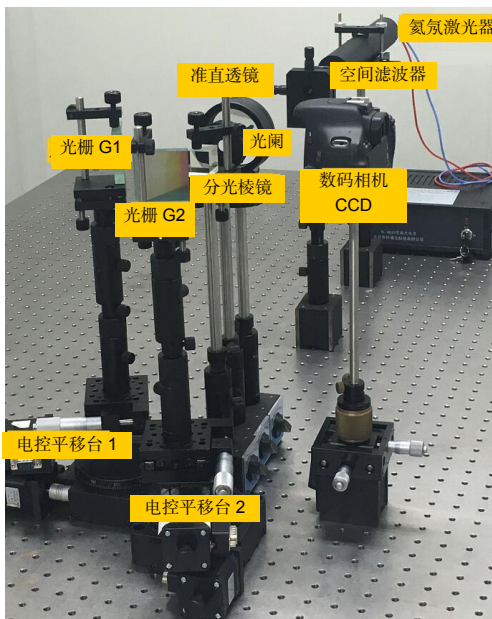


图3 氦氖激光器-SHS 实验平台 1.
Fig. 3 SHS experiment platform 1 of He-Ne laser.

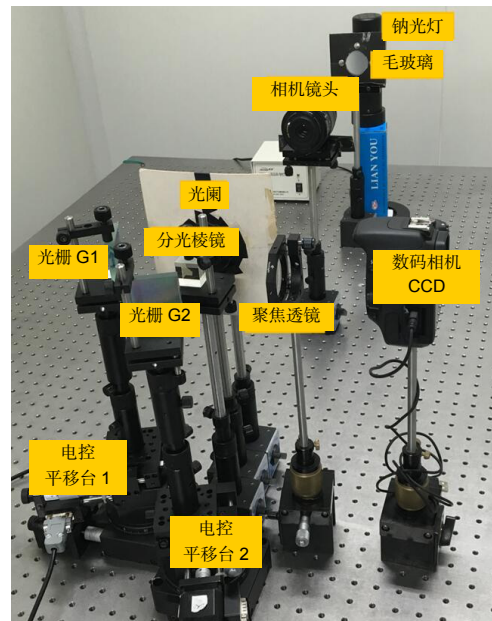


图4 钠光灯-SHS 实验平台 2.
Fig. 4 SHS experiment platform 2 of sodium.

表 1 实验平台 1/2 的相关性能参数.

Table 1 Relevant performance parameters of the experimental platform 1/2.

参数	实验平台 1	实验平台 2
光源	氦氖激光器 (632.8 nm)	钠光灯 (589/589.6 nm)
Littrow 波长/nm	631	589.7
Littrow 角/(°)	22.25	20.72
分辨极限/mm ⁻¹	0.1499	0.1605
分辨能力	10596	10596
光谱范围/mm ⁻¹	76.7488	82.1760

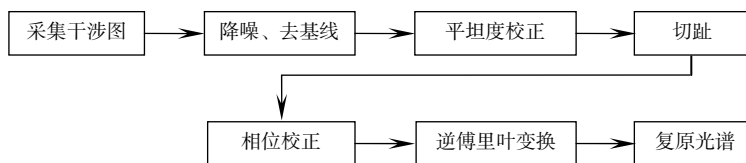


图 5 SHS 干涉图校正处理流程图.

Fig. 5 Flow chart of SHS interferogram correction processing.

2) 由于噪声会严重降低系统的信噪比,所以本节需要对干涉图及两臂光强分布图进行降噪处理,中值滤波是一种非线性信号处理技术,使用邻域中各点的中值来代替原点,让周围的像素值更接近真实值,从而消除孤立噪声点,降噪干涉图如图 6(a)所示,对应降噪复原光谱如图 6(b)所示。

3) 按照节 3.2 描述的平坦度校正方案对干涉图进

行校正处理,基本步骤为:① 计算修正因子 $\mu(x)$; ② 计算 $[I(x)/(I_A(x)+I_B(x))]-1$; ③ 将②的计算结果除以修正因子,即得到校正干涉图,如图 7(a)所示,对应平坦度校正复原光谱如图 7(b)所示。

4) 为了降低计算复杂度,提高校正效率,本文直接采用干涉图减去均值的方法进行基线去除,如图 8(a)所示,对应基线去除复原光谱如图 8(b)所示。

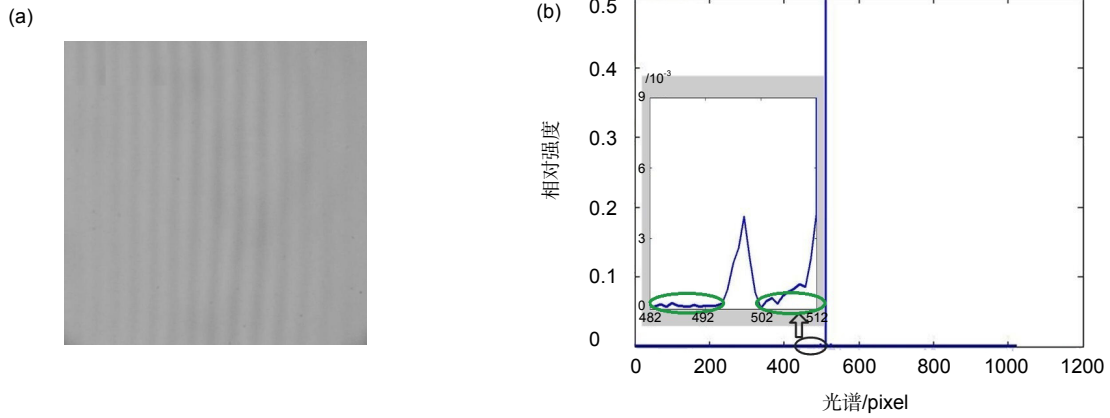


图 6 平台 2 降噪数据. (a) 降噪干涉图. (b) 降噪复原光谱.
 Fig. 6 Denoising data of platform 2. (a) Interferogram of denoising. (b) Recovered spectrum of denoising.

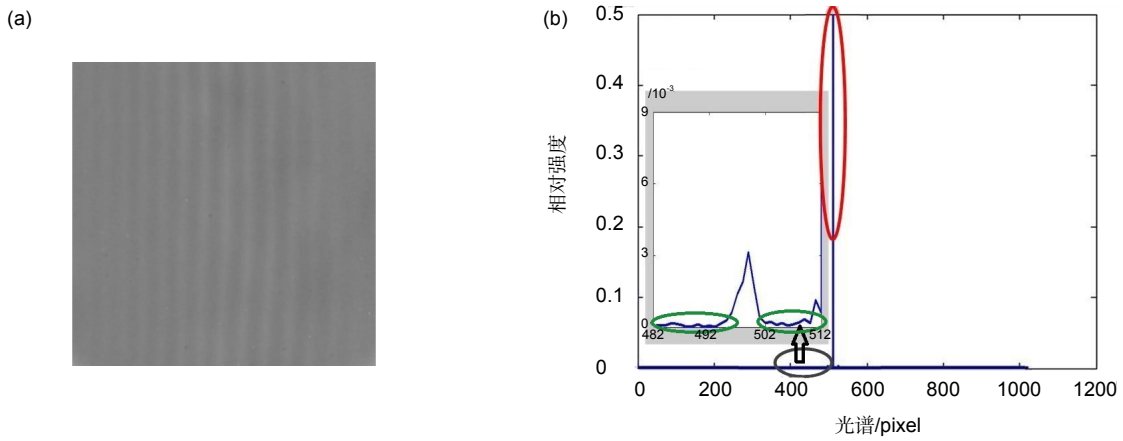


图 7 平台 2 平坦度校正数据. (a) 平坦度校正干涉图. (b) 平坦度校正复原光谱.
 Fig. 7 Flatfielding correction data of platform 2. (a) Interferogram of flatfielding correction. (b) Recovered spectrum of flatfielding correction.

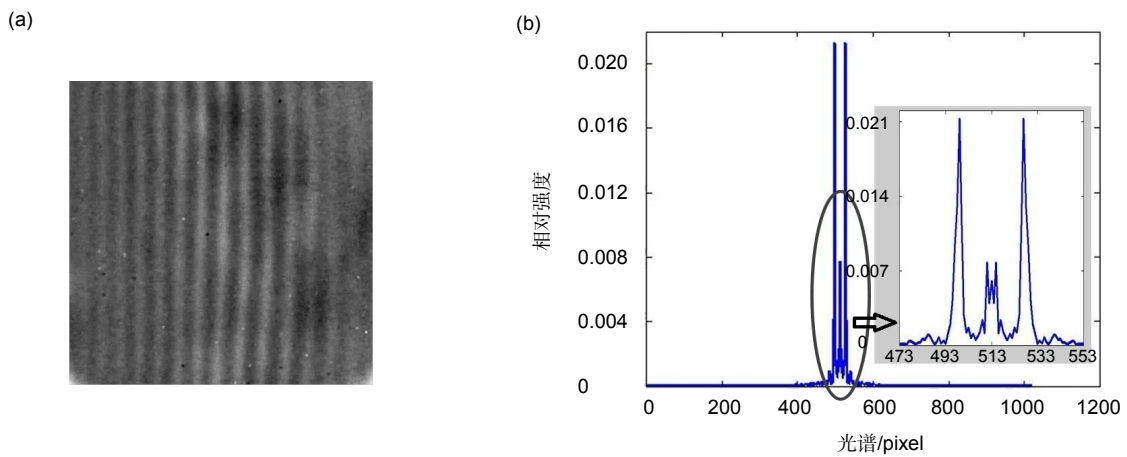


图 8 平台 2 基线去除数据. (a) 基线去除干涉图. (b) 基线去除复原光谱.
 Fig. 8 Removing baseline data of platform 2. (a) Interferogram of removing baseline. (b) Recovered spectrum of removing baseline.

5) 众多的切趾函数中,本文分别使用矩形窗、Hanning窗和Blackman-Harris窗进行处理后发现Blackman-Harris窗的旁瓣抑制性能最好,所以本节使用4阶Blackman-Harris窗函数对干涉图进行切趾处理,得到切趾后的干涉图如图9(a)所示,对应切趾复原光谱如图9(b)所示;

6) 经过切趾处理后的图像按照3.4节描述的相位补偿理论对干涉图进行相位校正,可以得到相位校正后的干涉图和复原光谱。

4.3 实验数据分析

4.3.1 实验数据计算

首先由平台的设计参数得到系统频谱图的中心坐

标为513,根据实函数傅里叶变换的性质,分析平台的复原光谱时取横轴大于或者小于513的一半级次空间即可。由此分别计算平台1和平台2的实际分辨极限如下:

1) 平台1干涉图校正处理与分辨极限计算。

① 直接对平台1采集的干涉图(如图10(a)所示)进行逆傅里叶变换,得到原始干涉图的复原光谱如图10(b)所示;

② 按照4.2节描述的干涉图校正处理步骤,将平台1采集的干涉图进行校正处理,得到校正干涉图如图11(a)所示;

③ 对②中校正后的干涉图进行逆傅里叶变换得到平台1的复原光谱如图11(b)所示;

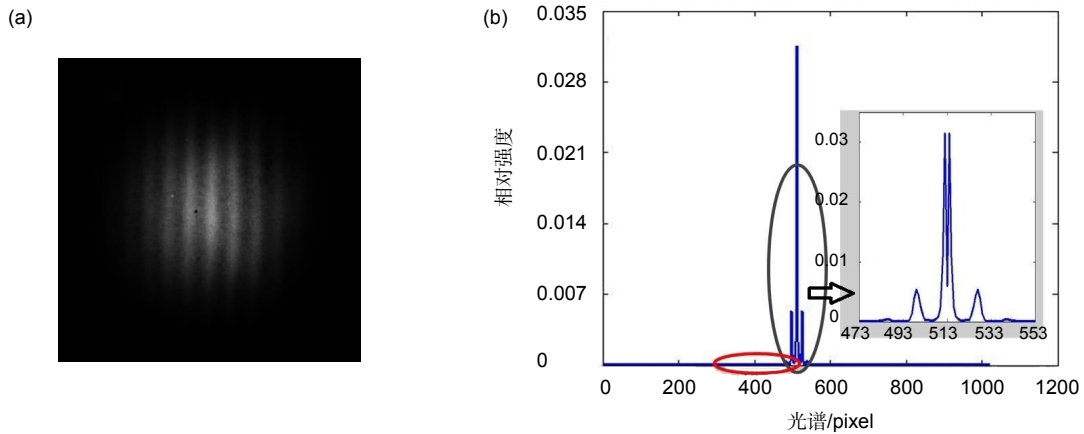


图9 平台2切趾数据。(a)切趾干涉图。(b)切趾复原光谱。

Fig. 9 Apodization data of platform 2. (a) Interferogram of apodization. (b) Recovered spectrum of apodization.

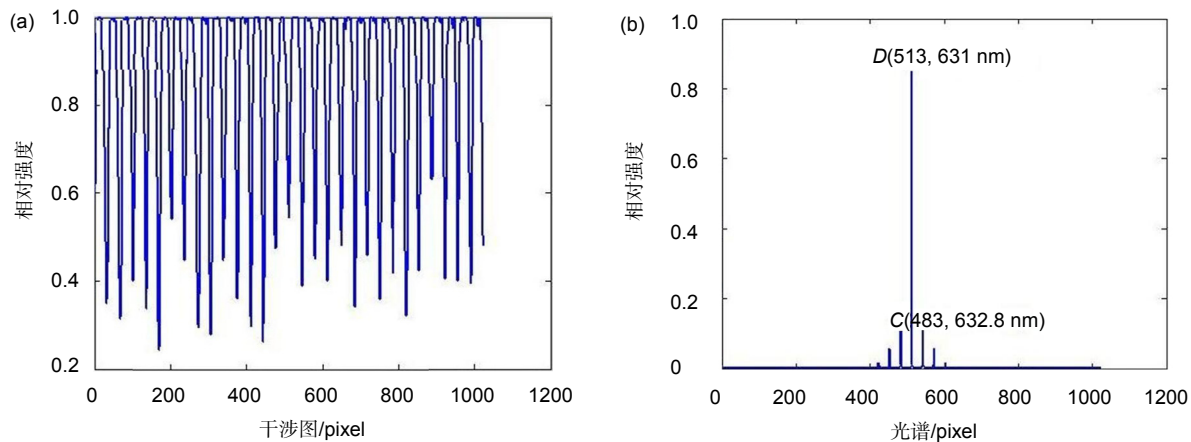


图10 平台1原始数据。(a)原始干涉图。(b)原始复原光谱。

Fig. 10 Original data of platform 1. (a) Original interferogram. (b) Original recovered spectrum.

④ 由平台 1 的设计参数可知, 系统的 Littrow 波长 631 nm 对应的横坐标为 513, 而图 11(b)中 C 点坐标为 483, 对应的是氦氖激光器的特征波长 632.8 nm, 所以平台 1 的实际分辨极限:

$$\delta\sigma_1 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta N} = \frac{1}{513-483} \times \left(\frac{10^6}{631} - \frac{10^6}{632.8} \right) = 0.1503 \text{ mm}^{-1}, \quad (18)$$

那么, 平台 1 中每个像元可以分辨的波数单位为 0.1503 mm^{-1} 。

2) 平台 2 干涉图校正处理与分辨极限计算。

① 直接对平台 2 采集的干涉图(如图 12(a)所示)进行逆傅里叶变换, 得到原始干涉图的复原光谱如图 12(b)所示;

② 按照 4.2 节描述的干涉图校正处理步骤, 将平

台 2 采集的干涉图进行校正处理, 得到校正干涉图如图 13(a)所示;

③ 对②中校正后的干涉图进行逆傅里叶变换得到平台 2 的复原光谱如图 13(b)所示;

④ 由平台 2 的设计参数可知, 系统的 Littrow 波长 589.7 nm 对应的横坐标为 513, 而图 13(b)中 F 点坐标 511, 对应波长 589.6 nm; E 点坐标 499, 对应波长 589 nm。所以平台 2 的实际分辨极限:

$$\delta\sigma_2 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta N} = \frac{1}{513-511} \times \left(\frac{10^6}{589.6} - \frac{10^6}{589.7} \right) = \frac{1}{511-499} \times \left(\frac{10^6}{589} - \frac{10^6}{589.6} \right) = 0.144 \text{ mm}^{-1}, \quad (19)$$

同理, 平台 2 中每个像元可以分辨的波数单位为 0.144 mm^{-1} 。

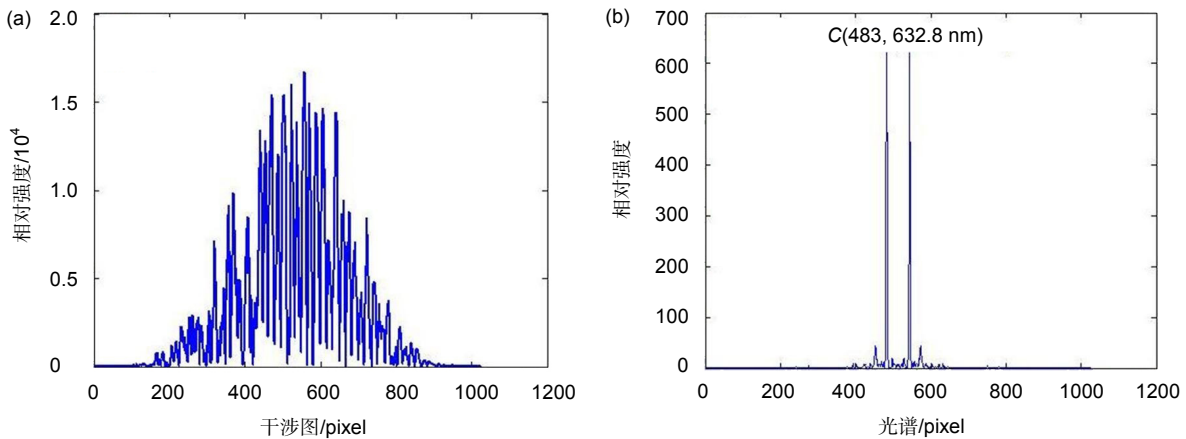


图 11 平台 1 校正数据. (a) 校正干涉图. (b) 校正复原光谱.

Fig. 11 Corrected data of platform 1. (a) Corrected Interferogram. (b) Corrected recovered spectrum.

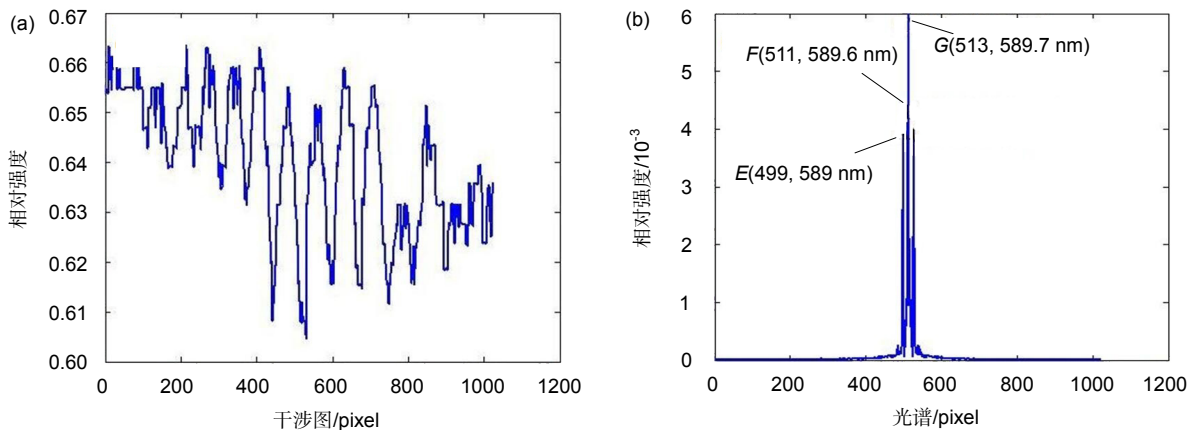


图 12 平台 2 原始数据. (a) 原始干涉图. (b) 原始复原光谱.

Fig. 12 Original data of platform 2. (a) Original interferogram. (b) Original recovered spectrum.

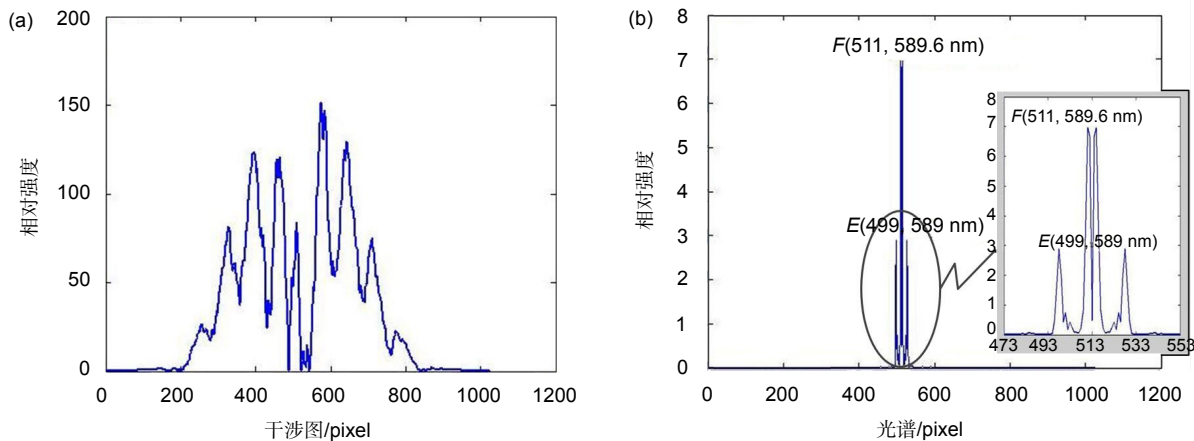


图 13 钠灯干涉图校正. (a) 相位校正后的干涉图. (b) 复原光谱.

Fig. 13 Interferogram processing of sodium lamp. (a) Phase corrected interferogram. (b) Recovered spectrum.

4.3.2 数据分析

根据 4.2 节与 4.3.1 节展示的系统原始干涉图分别经过去噪、平坦度校正、基线去除、切趾和相位校正等处理后的效果图可以看出:

① 经噪声去除后复原光谱(如图 6(b)所示)的谱线分布更平滑,特征谱线更清晰;

② 经平坦度校正后复原光谱(如图 7(b)所示)的能量分布更均匀,特征谱线振幅更突出(如图 7(b)中绿色标记);

③ 经基线去除后复原光谱(如图 8(b)所示)几乎消除了低频假信号(如图 7(b)中红色标记)对系统真实谱线的干扰;

④ 经切趾处理后的复原光谱中,可以明显看到真实光谱信号附近的伪谱线接近于零(如图 9(b)中红色标记);

⑤ 经相位校正后复原光谱的谱线与原始输入的谱线特性相一致,即图 13(b)中 A 点谱线强度比 B 点谱线强度弱。

综合上述处理结果可以看出:对本实验平台而言,只有综合使用上述干涉图校正方案才可以有效地补偿和抑制系统中的相关误差。

对比 4.1.2 节和 4.3.1 节中实验平台的理论分辨极限和实际分辨极限,结果发现:平台 1 分辨极限的误差约为 0.0004 mm^{-1} ,平台 2 分辨极限的误差约为 0.016 mm^{-1} ,说明平台的实际分辨与理论分辨具有良好的吻合性;而将本文结果与文献[12]和文献[34]的结果进行对比,表明本文提出的干涉图校正方案具有一定的优越性。

5 结论

本文在现有 SHS 干涉图校正处理研究的基础上,根据实际系统的需求提出了一种干涉图校正处理方案,并在搭建的实验平台上利用本文提出的干涉图校正处理方案对干涉图进行处理。实验结果显示平台 1 和平台 2 的实测光谱分辨能力与理论设计值之间具有良好的吻合性(平台 1 分辨极限误差约为 0.0004 mm^{-1} ,平台 2 分辨极限误差约为 0.016 mm^{-1}),表明干涉图校正处理方案可以有效地抑制系统中的各种干扰和畸变。另外,由于本文提出的干涉图校正方案并没有对系统的应用环境和设备提出额外的要求,可见本方案具有极高的普适性,可为 SHS 的研究提供一定的支持。

基金项目

重庆市基础科学与前沿技术研究专项项目(重点)(cstc2015jcyjB0493)。

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. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning[D]. Wisconsin: University of Wisconsin, 1991.
- 3 Brault J W. New approach to high-precision Fourier transform spectrometer design[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(16): 2891–2896.
- 4 Tian Zhaobing, Yam S S H, Loock H P. Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(10): 1105–1107.
- 5 Stacey D. The Fabry-Perot interferometer. History, theory, prac-

- tice and applications[J]. *Journal of Modern Optics*, 1990, **37**(7): 1279–1280.
- 6 Englert C R, Cardon J G, Stevens M H, *et al.* SHIMMER: using spatial heterodyne spectroscopy for the space based measurement of middle atmospheric hydroxyl[C]// Proceedings of the 35th COSPAR Scientific Assembly, 2004: 288.
 - 7 Sinclair K A. Design and test of a slab waveguide spectrometer for spatial heterodyne observations of water vapor[D]. York: York University, 2014.
 - 8 Harris W, Roesler F, Ben-Jaffel L, *et al.* Applications of spatial heterodyne spectroscopy for remote sensing of diffuse UV-vis emission line sources in the solar system[J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2005, **144-147**: 973–977.
 - 9 Harlander J M, Lawler J E, Roesler F L, *et al.* A high resolution broad spectral range spatial heterodyne spectrometer for UV laboratory astrophysics[C]. Fourier Transform Spectroscopy/Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment, 2007: FWA3.
 - 10 Lawler J E, Labby Z E, Roesler F L, *et al.* A spatial heterodyne spectrometer for laboratory astrophysics; first interferogram[C]. Proceedings of the NASA LAW 2006, 2006: 115.
 - 11 Suto H, Kuze A, Nakajima M, *et al.* Airborne SWIR FTS for GOSAT validation and calibration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7106**: 71060M.
 - 12 Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.* Correction of detector response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(5): 530001.
李志伟, 熊伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正[J]. *光学学报*, 2014, **34**(5): 530001.
 - 13 Griffiths P R, de Haseth J A. Fourier transform infrared spectrometry[M]. New York: Wiley, 1986: 297–302.
 - 14 Perkins C. Spatial heterodyne spectroscopy: modeling and interferogram processing[D]. Merrimack, Massachusetts: Merrimack College, 2013.
 - 15 Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin, *et al.* Experimental study on spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(5): 84–88.
叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱技术实验研究[J]. *光电工程*, 2007, **34**(5): 84–88.
 - 16 Englert C R, Harlander J M. Flatfielding in spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(19): 4583–4590.
 - 17 Fang Fang, Hu Zhenhua, Gu Xuejun, *et al.* Correction of spatial heterodyne spectroscopy interferogram[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2010, **27**(6): 650–654.
方芳, 胡振华, 顾学军, 等. 空间外差光谱仪干涉图修正研究[J]. *量子电子学报*, 2010, **27**(6): 650–654.
 - 18 Xiong Wei, Shi Hailiang, Yu Nenghai. Study on a new method for instrumental line shape measurement of spatial heterodyne interference spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(1): 267–271.
熊伟, 施海亮, 俞能海. 空间外差干涉光谱仪仪器线型函数测量新方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(1): 267–271.
 - 19 Englert C R, Harlander J M, Cardon J G, *et al.* Correction of phase distortion in spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(36): 6680–6687.
 - 20 Takada K, Aoyagi H, Okamoto K. Correction for phase-shift deviation in a complex Fourier-transform integrated-optic spatial heterodyne spectrometer with an active phase-shift scheme[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(7): 1044–1046.
 - 21 Wang Xinqiang, Ye Song, Zhang Lijuan, *et al.* Study on phase correction method of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(5): 1424–1428.
王新强, 叶松, 张丽娟, 等. 空间外差光谱仪相位校正方法的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(5): 1424–1428.
 - 22 Wang Xinqiang, Ye Song, Xiong Wei, *et al.* Calibration of fundamental frequency wavelength of spatial heterodyne spectrometer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(4): 827–831.
王新强, 叶松, 熊伟, 等. 空间外差光谱仪基频波长的定标[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(4): 827–831.
 - 23 Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.* Study on laboratory calibration of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(4): 0430002.
李志伟, 熊伟, 施海亮, 等. 空间外差光谱仪实验室定标技术研究[J]. *光学学报*, 2014, **34**(4): 0430002.
 - 24 Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.* Correction of detector or response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(5): 0530001.
李志伟, 熊伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正[J]. *光学学报*, 2014, **34**(5): 0530001.
 - 25 Luo Haiyan, Shi Hailiang, Li Zhiwei, *et al.* Thermal effect on optical properties of spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(9): 2578–2581.
罗海燕, 施海亮, 李志伟, 等. 温度对星载空间外差干涉型光谱仪性能的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, **34**(9): 2578–2581.
 - 26 Li Ruijie, Dang Anhong. A blind detection scheme based on modified wavelet denoising algorithm for wireless optical communications[J]. *Optics Communications*, 2015, **353**: 165–170.
 - 27 Wan Shengpeng, He Xingdao, Fang Lihua. Distributed Brillouin fiber sensing based on spectrum line fitting and wavelet packet denoising[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(24): 4971–4976.
 - 28 Li Dongming, Zhang Lijuan, Yang Jinhua, *et al.* Research on wavelet-based contourlet transform algorithm for adaptive optics image denoising[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, **127**(12): 5029–5034.
 - 29 Wu Kaizhi, Zhang Xuming, Ding Mingyue. Curvelet based non-local means algorithm for image denoising[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2014, **68**(1): 37–43.
 - 30 Li Zhigang, Wang Shurong, Li Futian. Data processing for interferogram of ultraviolet Fourier transform spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2000, **20**(2): 203–205.
李志刚, 王淑荣, 李福田. 紫外傅里叶变换光谱仪干涉图数据处理[J]. *光谱学与光谱分析*, 2000, **20**(2): 203–205.
 - 31 Mertz L. Auxiliary computation for Fourier spectrometry[J]. *Infrared Physics*, 1967, **7**(1): 17–23.
 - 32 Mertz L. Transformations in optics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1965: 21–43.
 - 33 Harris F J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1978, **66**(1): 51–83.
 - 34 Feng Yutao, 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.