

偏振型干涉成像光谱仪谱线位置定标方法的研究

魏宇童 刘尚阔 颜廷昱 李祺伟

Study on the methods of calibrating spectral line position of interference imaging spectrometer

Wei Yu-Tong Liu Shang-Kuo Yan Ting-Yu Li Qi-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 080601 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.080601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.080601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I8>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

荧光激光雷达技术探测水面油污染系统仿真研究

[Simulation of fluorescence lidar for detecting oil slick](#)

物理学报.2016, 65(7): 070704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070704>

同步辐射中双压电片反射镜的研究现状

[Present research status of piezoelectric bimorph mirrors in synchrotron radiation sources](#)

物理学报.2016, 65(1): 010702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.010702>

基于激光诱导叶绿素荧光寿命成像技术的植物荧光特性研究

[Study of plant fluorescence properties based on laser-induced chlorophyll fluorescence lifetime imaging technology](#)

物理学报.2015, 64(19): 190702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.190702>

一种新型的用于差分吸收激光雷达中脉冲式光学参量振荡器的种子激光器的频率稳定方法

[A novel frequency stabilization method for the seed laser of the pulse optical parametric oscillator in differential absorption lidar](#)

物理学报.2015, 64(2): 020702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020702>

沿时间逐步求解应力的拉格朗日分析方法研究

[Study on Lagrangian analysis for solving the stress gradually along the time](#)

物理学报.2012, 61(20): 200703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.200703>

# 偏振型干涉成像光谱仪谱线位置 定标方法的研究\*

魏宇童<sup>1)2)†</sup> 刘尚阔<sup>3)</sup> 颜廷昱<sup>1)2)</sup> 李祺伟<sup>1)2)</sup>

1)(西安交通大学理学院, 西安 710049)

2)(西安交通大学空间光学研究所, 西安 710049)

3)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2015年11月10日收到; 2016年1月12日收到修改稿)

论述了偏振型干涉成像光谱仪的工作原理, 针对复原光谱谱线位置漂移问题, 提出了原理修正和数据处理两种具有代表性的实验室谱线位置定标方法, 给出了定标结果及对比分析. 原理修正方法从干涉型成像光谱仪的参数选择着手, 分析了产生谱线位置漂移的原因, 针对复原谱线位置随行变化的问题, 给出了修正方案, 使得谱线位置精度明显提高; 对于给定的四组激光器标准波长, 谱线位置均方根误差由定标前的 28.3914 下降至 5.5371, 该方法对干涉型成像光谱仪具有普适性, 且其定标参数对分析仪器指标提供了便利. 数据处理方法弥补了原理修正定标存在的数据量大、短波定标效果弱等弊端, 谱线位置均方根误差下降至 0.9178, 该方法实施简单, 对不同的输入波长, 所取不同行的数据用统一的表达式进行修正. 该方法化繁为简、间接定标的思想具有一定的借鉴价值. 该研究为偏振型干涉成像光谱仪的设计、研制、调试和工程化提供了重要的理论依据和实践指导.

**关键词:** 谱线位置定标, 原理修正, 数据处理, 逐行修正

**PACS:** 06.20.fb, 07.05.Kf, 07.60.-j, 42.30.Kq

**DOI:** 10.7498/aps.65.080601

## 1 引言

20世纪90年代以来, 随着干涉成像光谱技术的出现, 成像光谱仪朝着小型化、高通量、多通道、高分辨率的方向发展<sup>[1]</sup>. 从美国于1996年研制的数字阵列扫描干涉成像光谱仪(digital array scanned interferometers, DASI)至今, 多个国家均发射了用于地球观测与监测的干涉型成像光谱仪, 如中分辨成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)<sup>[2]</sup>、中等分辨率成像光谱仪(medium resolution imaging spectrometer, MERIS)<sup>[3]</sup>、小型高分辨成像光谱仪(compact

high-resolution imaging spectrometer, CHRIS)<sup>[4]</sup>、嫦娥一号干涉成像光谱仪等<sup>[5]</sup>. 作为偏振干涉成像光谱仪的核心部件—分光干涉仪, 通常采用Sagnac干涉仪<sup>[6-8]</sup>和双折射晶体型偏振干涉仪<sup>[9]</sup>. 与Sagnac干涉仪比较, 偏振型体积更小、费用更低、能量利用率高, 同时解决了航天遥感器中普遍存在的探测器对不同偏振度的偏振光响应效率不同的缺点<sup>[10]</sup>.

定标是成像光谱仪定量反演的前提, 其精度直接决定了最终产品的数据精度<sup>[11]</sup>. 通过定标可以验证成像光谱仪的各项技术指标是否满足设计要求, 并且可以为以后的仪器测量数据提供参考. 成像光谱仪定标工作的重点是复原光谱的位置信息

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 41530422)、国家自然科学基金(批准号: 61540018, 61275184, 61405153)、国家重大专项(批准号: 32-Y30B08-9001-13/15)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2012AA121101)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20130201120047)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: helln7@sina.com

和强度信息, 而谱线位置的准确是定标强度信息的前提. 因此, 开发一种普适、高效的谱线位置定标方法显得尤为重要. 目前国内外针对谱线位置定标研究的有价值的文章较少, 主要是介绍电荷耦合器件 (CCD) 平场及绝对辐射定标, 谱线位置定标在个别文献中虽有提及, 但描述都十分简单. 王明志等<sup>[12]</sup>对光栅色散型成像光谱仪谱线中心波长偏移进行了研究, 用线性拟合的关系给出了误差波长和修正波长的关系; 赵葆常等<sup>[13]</sup>对嫦娥一号干涉成像光谱仪的定标技术进行了讲述, 侧重于辐射定标方法与效果, 给出了谱线位置检测的结果; 李志伟等<sup>[11]</sup>对空间外差光谱仪定标技术进行了研究, 给出了线性的谱线位置定标表达式, 但由于系统整体装调良好, 谱线随复原行数变化很小, 因此并未考虑谱线位置随 CCD 行变化的关系; 高静等<sup>[14]</sup>对空间调制型干涉成像光谱仪定标技术进行了研究, 其通过计算干涉仪的横向剪切量确定了最大光程差, 得到了较高精度的光谱分辨率, 并利用 5 种波长的激光器对谱线位置进行了标定, 由于标准波长与复原波长差别很小, 因此未进行特别的定标修正; 刘倩倩等<sup>[15]</sup>对超高分辨率光谱定标技术的发展概况做了详细的叙述, 表明在定标光源的选取方面, 利用谱线灯进行光谱定标的方法具有结构简单、易于操作的优点, 而单色仪和可调谐激光器的应用提高了定标精度, 实用性强, 并且弥补了传统定标方法不能对光谱带宽进行准确标定的不足; Anderson<sup>[16]</sup>介绍了 VIFIS (variable interference filter imaging spectrometer) 成像光谱仪的定标工作, 利用最小二乘拟合给出了谱线位置定标表达式, 同样忽略了谱线位置随 CCD 行的变化. Julia 等<sup>[17]</sup>针对基于 Wollaston 棱镜的成像光谱偏振仪的定标技术做了较为详细的介绍, 在谱线位置定标方面, 其根据仪器设计的最大频率得到了仪器的最大光程差, 从而

确定出波数维的光谱采样间隔, 对谱线位置进行了依次排列; Micheal 和 Eustacey<sup>[18]</sup>在紧凑型成像光谱仪的研究中, 其对双折射晶体在不同波长所提供的光程差进行了补偿, 因此对由双折射晶体色散引起的谱线位置误差做了修正; Kim 等<sup>[19]</sup>选取多个宽波段的发光二极管以及激光器的组合, 利用低相干干涉的方法对色散型光谱仪的光谱响应以及谱线间隔进行了标定, 给出了精确的谱线位置. 关于谱线定标的国内外文献显示, 大都采用拟合的方式直接建立复原波长及标准波长的关系, 而为了提高定标精度, 会考虑利用光谱和干涉图这一对傅里叶变换对, 给出仪器的最大光程差从而完成谱线位置标定.

本文在简要介绍偏振型干涉成像光谱仪的基础上, 着重就仪器谱线位置定标工作展开研究, 介绍了两种具有代表性的谱线位置定标方法, 并给出了定标结果和分析. 根据干涉型成像光谱仪原理提出了原理修正定标方法, 分析了谱线位置误差产生的原因, 给出了修正方案, 提高了谱线位置精度, 该方法具有普适性. 针对原理修正存在的数据量大, 短波定标效果弱等弊端, 提出了数据处理定标方法, 大幅提高了定标精度, 且实施简单, 对不同的输入波长, 所取不同行的数据用统一的表达式进行修正. 该化繁为简、间接定标的思想具有借鉴价值.

## 2 偏振干涉成像光谱仪原理

偏振干涉成像光谱仪的原理如图 1 所示, 主要由  $L_1$ ,  $L_2$  组成的前置望远系统, 起偏器  $P_1$ , 偏振干涉仪 SP, 检偏器  $P_2$  及成像镜  $L_3$  组成. 目标物发出的光经过前置望远系统准直后, 经过  $P_1$  变为沿  $P_1$  偏振化方向振动的一束线偏振光, 经偏振干涉仪 SP 后被剪切成一束束振动方向相互垂直的线偏振光,

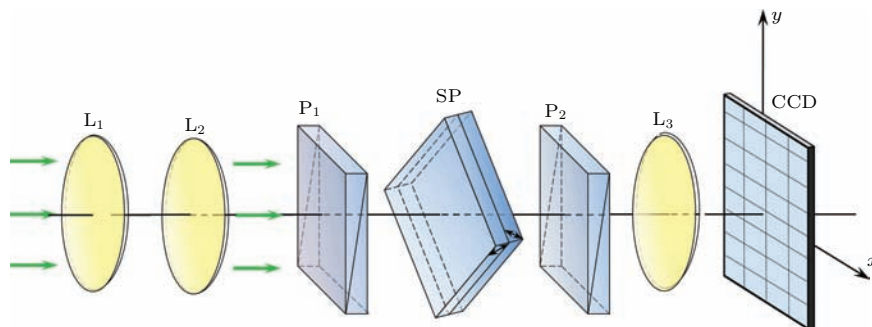


图 1 偏振干涉成像光谱仪原理图

Fig. 1. Schematic diagram of interference imaging spectrometer.

通过检偏器  $P_2$  变成振动方向完全一致的两束线偏振光, 经过成像镜  $L_3$  后在探测器上相遇, 形成干涉图样<sup>[20–24]</sup>. 该装置中没有狭缝, 增大了仪器的光通量<sup>[25,26]</sup>. 对干涉图数据首先进行相对辐射定标, 即平场工作, 消除 CCD 响应不均及非线性问题, 然后进行数据立方体重构, 取干涉图的一行(光程差维)像元进行去背景、滤波、切趾等数据预处理<sup>[27–29]</sup>, 最后进行傅里叶变换, 即可得到目标光谱强度随波长的分布及目标像<sup>[30]</sup>. 我们的研究工作就是建立在经过数据预处理的干涉图信息基础上展开的.

### 3 谱线位置定标

#### 3.1 原理修正方法

偏振型干涉成像光谱仪实验样机选用美国 Sarnoff 公司  $512 \times 512$  CAM512CCD 作为接收器, 系统探测波段为 480–960 nm (波数  $10416.67\text{--}20833.33\text{ cm}^{-1}$ ), 光谱通道数  $N$  为 128, 即仪器的波数分辨率为  $\Delta\sigma_{\text{Orig}} = (\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}})/N = 81.38\text{ cm}^{-1}$ , 其中  $\sigma_{\text{max}} = 20833.33\text{ cm}^{-1}$ ,  $\sigma_{\text{min}} = 10416.67\text{ cm}^{-1}$ . 仪器的波数分辨率由干涉仪提供的最大光程差  $\Delta_{\text{max}}$  确定, 其满足  $\Delta_{\text{max}} = 1/2\Delta\sigma_{\text{Orig}} = 61.44\text{ }\mu\text{m}$ . 干涉图采用双边带采样, 即每行 CCD 相邻像元采集的光程差间隔为  $\Delta\delta = \Delta_{\text{max}}/256 = 0.24\text{ }\mu\text{m}$ , 其正好满足奈奎斯特采样定理要求的  $\Delta\delta \leq 1/2\sigma_{\text{max}} = 0.24\text{ }\mu\text{m}$ <sup>[31]</sup>.

由于干涉仪部件偏光镜的加工厚度及材料折射率误差, 其所能提供的最大光程差并非理想的  $61.44\text{ }\mu\text{m}$ . 如果厚度为正误差, 即  $\Delta_{\text{max}} > 61.44\text{ }\mu\text{m}$ , 则  $\Delta\delta > 0.24\text{ }\mu\text{m}$ , 则仪器所能探测的最大波数  $\sigma_{\text{max}} < 20833.33\text{ cm}^{-1}$ , 即会出现高频频谱混叠的情况; 如果厚度为负误差, 则  $\Delta_{\text{max}} < 61.44\text{ }\mu\text{m}$ , 即  $\Delta\delta < 0.24\text{ }\mu\text{m}$ , 则  $\Delta\sigma_{\text{Orig}} > 81.38\text{ cm}^{-1}$ , 即仪器的谱线分辨率将会下降, 上述两种误差均会造成谱线位置的漂移现象.

图 2 为设想的复原光谱图, 其横坐标为经过傅里叶变换后的点数, 每点对应具体的波数值. 理想情况如图中红点所示, 由于傅里叶变换后波数维为等间隔区间, 仪器探测的截止频率  $\sigma_{\text{max}} = 20833.33\text{ cm}^{-1}$ , 其在 0 波数与  $\sigma_{\text{max}}$  之间平均分为了 256 份, 则仪器探测的最小频率

$\sigma_{\text{min}} = \sigma_{\text{max}}/2 = 10416.67\text{ cm}^{-1}$  位于第 128 点, 因此, 对干涉图进行滤波、切趾等预处理工作后, 进行傅里叶变换, 截取第 128 点至 256 点, 即对应波数  $10416.67\text{--}20833.33\text{ cm}^{-1}$  区间, 即仪器探测的 480–960 nm 波段.

由于上文提到的干涉仪部件加工及装配误差, 实际仪器探测的截止频率  $\sigma_{\text{max}}$  并不为  $20833.33\text{ cm}^{-1}$ , 如图 2 中绿点所示, 图中  $\sigma_2 = 20833.33\text{ cm}^{-1}$  位于第 253 点, 对应的  $\sigma_1 = 10416.67\text{ cm}^{-1}$  位于第 127 点. 因此, 进行谱线位置定标, 需要获得仪器最小频率(或截止频率)所在点数 Position1 及最佳波数间隔  $\Delta\sigma_{\text{best}}$  这两个参量的信息, 即可以将各点代表的谱线位置信息确定.

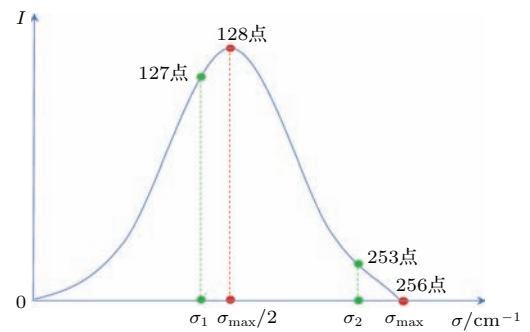


图 2 (网刊彩色) 谱线位置示意图

Fig. 2. (color online) Sketch map of spectral line position.

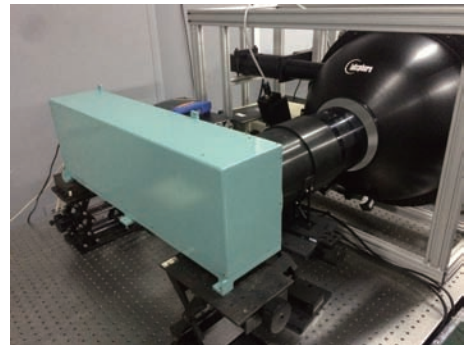


图 3 谱线位置定标实验图

Fig. 3. Processing of spectral line position calibration.

图 3 为定标实验图, 在实验中采用四组不同波长的激光器作为光源, 选取采集数据第 1 行至第 500 行不同行的干涉图数据进行复原, 得到的光谱如图 4 所示. 可以发现, 不同行下得到的谱线位置并不相同, 并且随复原行数的增大而明显增大. 造成上述现象的主要原因是仪器中干涉仪部件所提供的光程差按列分布不理想所致; 另外, 在相对辐射定标中, 按列定标后残余的

误差也会对谱线位置造成影响, 这为谱线位置定标工作增加了难度和工作量, 需要对干涉图数据逐行进行谱线位置定标, 即每一行都需要一组定标的参量 ( $\text{Position1}_{(i)}, \Delta\sigma_{\text{best}((i))}$ ), 其中  $i = 1, 2, 3, \dots, 512$ .

$\text{Position1}_{(i)}$  的确定是通过将已知波长的单色仪光源射入积分球内, 产生均匀辐射光, 利用仪器进行数据采集进行的. 定标实验中, 由于不确定偏光镜厚度误差的正负, 如果采用单色仪 480 nm 的输出作为定标光源, 则可能会出现频谱混叠的现象而致使  $\text{Position1}_{(i)}$  位于 256 点之外而无法获得, 因此采用 960 nm 作为定标光源, 对获取的干涉图逐行进行傅里叶变换确定  $\text{Position1}_{(i)}$ , 其值与行数之间的关系如图 5(a) 所示.

由图 5 可知,  $\text{Position1}_{(i)}$  随行数的增加呈现单调递减的趋势, 其值在 115 至 123 点之间浮动, 与理论值 128 点的差距随行数逐渐增大, 这与图 4 中单色光实验的结果相符合.

$\text{Position1}_{(i)}$  确定后, 下一步工作为确定每一

行的  $\Delta\sigma_{\text{best}((i))}$ . 我们利用单色仪作为单色光源, 在仪器探测波段内间隔 50 nm 采集一次单色光  $\sigma_\lambda$  数据, 得到该波长对应的复原点数  $\text{Position2}$ , 后以理论波数间隔  $\Delta\sigma_{\text{Orig}} = 81.38 \text{ cm}^{-1}$  作为基准, 在  $\Delta\sigma_{\text{Orig}} \pm 10 \text{ cm}^{-1}$  的区域内, 每次步进  $0.1 \text{ cm}^{-1}$ , 找寻 (1) 式的最小值, 即确定最佳波数间隔  $\Delta\sigma_{\text{best}}$ .

$$\min \left( \frac{1}{960} + (\text{Position2} - \text{Position1}) \times \Delta\sigma_{\text{best}} - \sigma_\lambda \right). \quad (1)$$

最终,  $\Delta\sigma_{\text{best}((i))}$  随行的变化趋势如图 5(b) 所示, 曲线整体呈现递增趋势, 最佳波数间隔在  $79\text{--}83.5 \text{ cm}^{-1}$  之间浮动.

我们将 ( $\text{Position1}_{(i)}, \Delta\sigma_{\text{best}((i))}$ ) 的定标结果应用到复原的单色光谱线中, 由于单色仪的谱线位置精度有限, 检测光源选取实验室现有的 543.5, 594.1, 612, 632.8 nm 4 组激光器作为输入波长, 选取不同行进行光谱复原, 如图 6 所示.

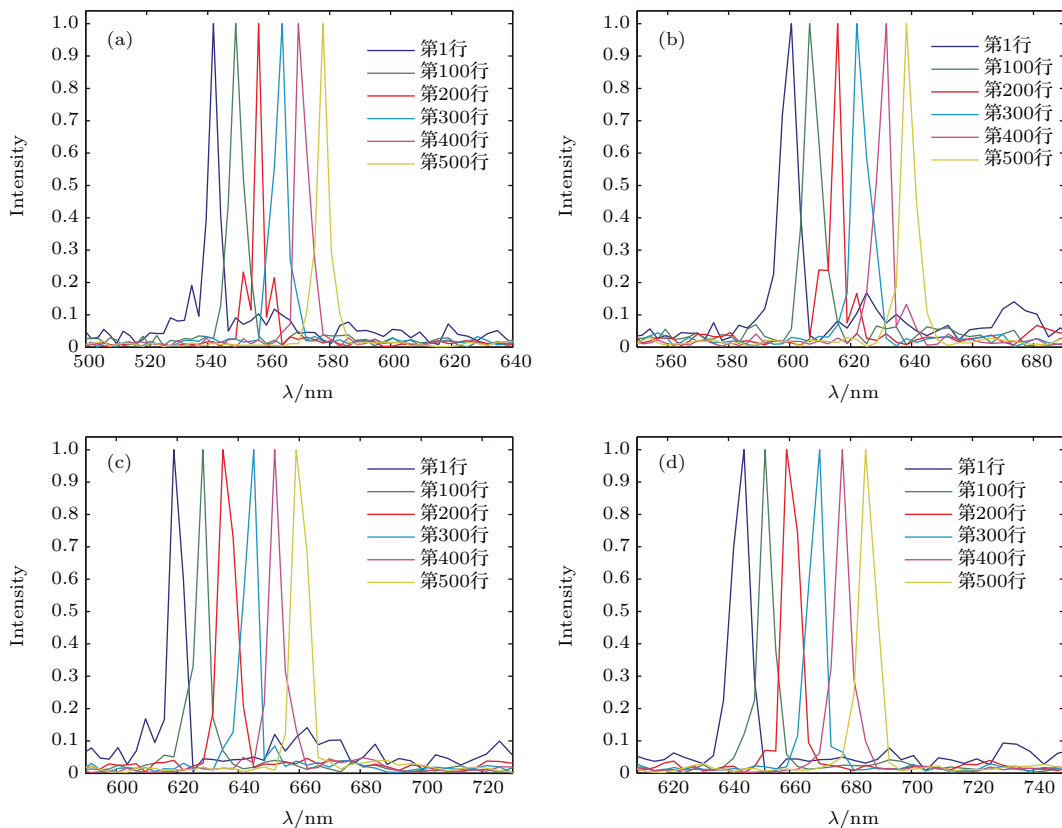


图 4 不同波长激光器复原谱线位置随行的变化 (a) 543.5 nm 激光器; (b) 594.1 nm 激光器; (c) 612 nm 激光器; (d) 632.8 nm 激光器

Fig. 4. Spectral line position as function of line number: (a) Wavelength of 543.5 nm; (b) wavelength of 594.1 nm; (c) wavelength of 612 nm; (d) wavelength of 632.8 nm.

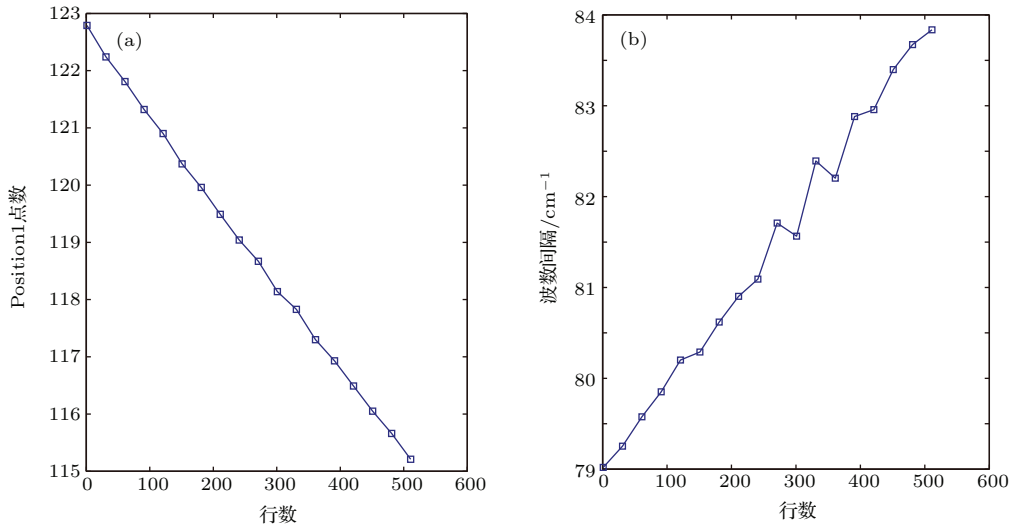


图5 定标参量随行变化示意图 (a) Position1<sub>(i)</sub> 随行变化示意图; (b) 波数间隔随行变化示意图

Fig. 5. Calibration parameter as function of line number: (a) Position1<sub>(i)</sub> as function of line number; (b)  $\Delta\sigma_{\text{best}(i)}$  as function of line number.

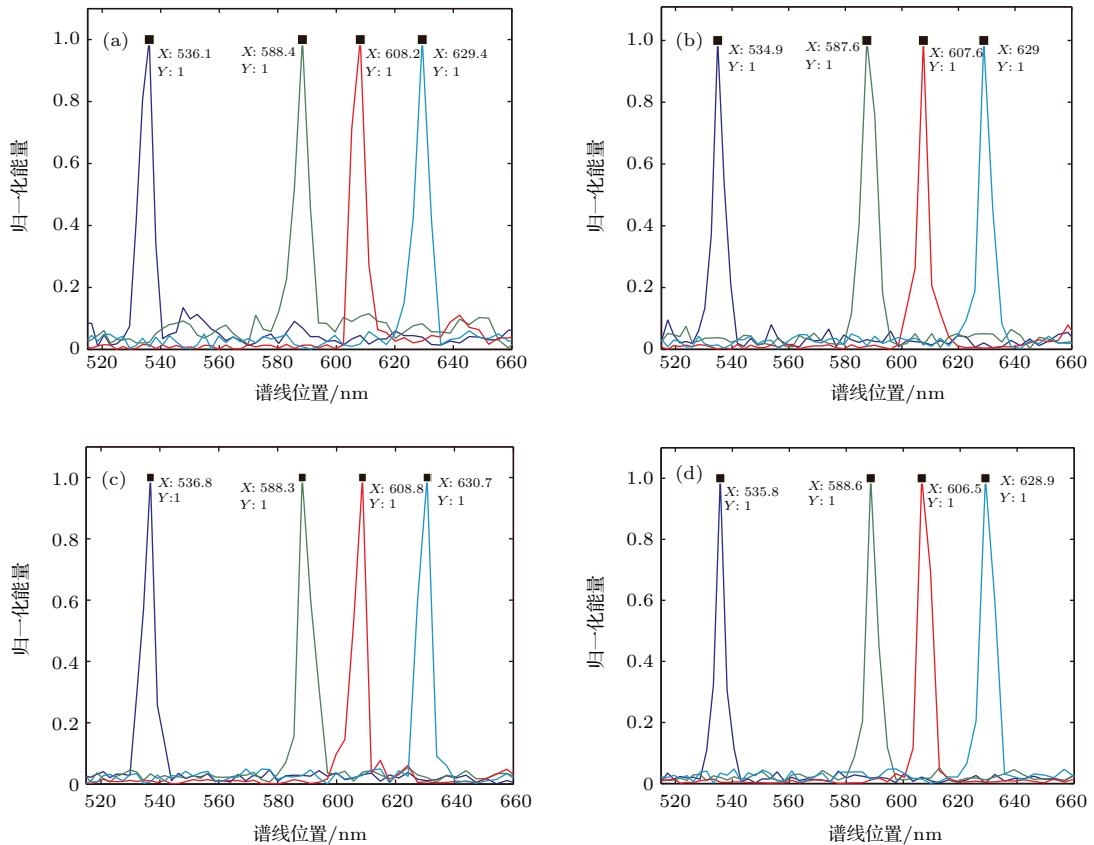


图6 定标后谱线位置随行的变化 (a) 第1行定标后谱线位置; (b) 第100行定标后谱线位置; (c) 第300行定标后谱线位置; (d) 第500行定标后谱线位置

Fig. 6. Spectral line position after calibration as function of line number: (a) Spectral line position of line 1; (b) spectral line position of line 100; (c) spectral line position of line 300; (d) spectral line position of line 500.

对于选定的4组不同波长的激光器, 其均方根误差(RMS)如表1所列, 可以看到, 定标之前均方根误差很大, 谱线位置随行的偏移现象剧烈, 必须

对结果进行修正才能真实地反映出所探测目标的光谱信息. 经过原理修正方法定标后, 谱线位置均方根误差明显减小, 并且波长越长, 均方根误差越

表1 定标结果与定标前数据均方根误差比较  
Table 1. RMS error of spectral line position between original data and calibration data.

标准波长/nm	定标前 均方根误差	原理修正 均方根误差	数据处理 均方根误差
543.4	20.0916	8.3282	1.0278
594.1	28.1060	5.5739	0.8630
612.0	30.7774	5.1274	0.8152
632.8	34.5908	3.1190	0.9653
均值	28.3914	5.5371	0.9178

小, 谱线精度越高. 定标精度随波长变化是由于干涉仪部件 Savart 偏光镜存在色散引起的, 由于 Savart 偏光镜采用的是双折射晶体作为分光介质材料, 所以对于不同波长的光, 其对应的寻常光和非寻常光的折射率  $n_o(\lambda)$ ,  $n_e(\lambda)$  是不同的. 以方解石为例, 其在常温下的折射率变化如 (2), (3) 式所示, 而 Savart 偏光镜提供的最大光程差  $\Delta_{\max}$  是双折射率的函数 [25], 如 (4) 式所示.

$$n_o^2 - 1 = \frac{0.8559\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0588^2} + \frac{0.8391\lambda^2}{\lambda^2 - 0.141^2} + \frac{0.0009\lambda^2}{\lambda^2 - 0.197^2} + \frac{0.6845\lambda^2}{\lambda^2 - 7.005^2}, \quad (2)$$

$$n_e^2 - 1 = \frac{1.0856\lambda^2}{\lambda^2 - 0.07897^2} + \frac{0.0988\lambda^2}{\lambda^2 - 0.142^2} + \frac{0.317\lambda^2}{\lambda^2 - 11.468^2}, \quad (3)$$

$$\Delta_{\max} = t \left[ \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} (\cos \omega + \sin \omega) \sin i \right], \quad (4)$$

其中,  $a = 1/n_e(\lambda)$ ,  $b = 1/n_o(\lambda)$ ,  $t$  为 Savart 偏光镜的单板厚度,  $i$  为入射角,  $\omega$  为入射面与 Savart 偏光镜左板主平面之间的夹角. 可见其寻常光和非寻常光的折射率是随波长变化的, 这也就导致了不同波长的光在经历了同一系统后最终的光程差是不同的. 由 (4) 式可知, 对于色散系统, 其分光干涉装置提供的最大光程差  $\Delta_{\max,\lambda}$  为波长  $\lambda$  的函数, 且波长越短,  $\Delta_{\max,\lambda}$  越大. 由于 CCD 的行像素个数为确定的数  $M$ , 因此光程差采样间隔  $\Delta\delta_\lambda = \Delta_{\max,\lambda}/M$  以及仪器的截止频率  $\sigma_{\max,\lambda} \leq 1/2\Delta\delta_\lambda$  皆为波长的函数. 即对于不同波长入射光形成的干涉图, 傅里叶变换后频域的截止频率  $\sigma_{\max,\lambda}$  随波长增加而增大, 这直接影响了  $\text{Position}1_{(i)}$  的确定, 因而会对定标精度造成影响. 本实验中  $\text{Position}1_{(i)}$  的计算选取了入射波长为 960 nm 单色光, 由此得到的长波定标精度优于短波定标精度. 经过原理修正的方

法, 仪器的谱线位置已达到应用精度水平. 该方法为干涉型成像光谱仪谱线位置定标提供了一种普适方法, 对于非色散系统精度更高, 且利于了解成像光谱仪采集数据的各项信息.

### 3.2 数据处理方法

原理修正的定标方法, 对于干涉图的每行数据都需计算出相应的  $(\text{Position}1_{(i)}, \Delta\sigma_{\text{best}((i))})$ , 计算量大, 且对于短波修正的效果仍然有待提高, 因此我们从获取的数据出发, 设想直接复原得到的谱线位置  $\lambda_{\text{Rec}}$ , 其与理想谱线位置  $\lambda_{\text{Corrected}}$  之间的关系, 可以通过 (5) 式线性拟合的方式来表示, 其关系为

$$\lambda_{\text{Corrected}} = k_1\lambda_{\text{Rec}} + b_1. \quad (5)$$

然而, 由于不同行复原谱线位置并不相同, 并且随复原行数的增大而明显增大, 因此, 同样需要对干涉图数据逐行进行谱线位置定标, 即每一行都需要一组二项式系数  $(k_i, b_i)$ , 其中  $i = 1, 2, 3, \dots, 512$ , 其数据量大, 背离了数据处理方法的初衷, 且仪器的实际应用中并不理想.

鉴于此, 我们提出一种谱线位置定标数据处理的方法, 通过简单的表达式实现对不同输入波长、不同行的统一定标. 该方法的思想为先将每一行的复原谱线位置统一到一个变化缓慢的值  $\lambda_{\text{Same}}$ , 再建立  $\lambda_{\text{Same}}$  与理想谱线位置  $\lambda_{\text{Corrected}}$  之间的关系, 并且该关系对不同的入射光波长具有普遍适用性, 即通过 (6), (7) 式组进行谱线位置定标工作.

$$\lambda_{\text{Same}} = \lambda_{\text{Rec}} - k_{\text{Mid}}L, \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{Corrected}} = k_{\text{Last}}\lambda_{\text{Same}} + b_{\text{Last}}, \quad (7)$$

其中,  $k_{\text{Mid}}$ ,  $k_{\text{Last}}$ ,  $b_{\text{Last}}$  为待求二项式系数,  $L$  为所取 CCD 行数. 实验中选取四组不同波长的激光器作为定标光源, 其中心波长分别为 543.5, 594.1, 612 及 632.8 nm. 将激光器打入积分球内产生均匀辐射光, 利用偏振型干涉成像光谱仪进行数据采集, 每组激光器采集 5 组干涉图数据求平均值, 获得 4 幅单色光干涉图. 对干涉图进行相对辐射定标, 然后选取每幅干涉图的不同行进行数据反演, 得到复原谱线位置  $\lambda_{\text{Rec}}$  随行数  $L$  的变化规律, 如表 2 所列. 对其进行线性拟合即可得到

$$\lambda_{\text{Rec}} = k_iL + b_i, \quad (8)$$

其中,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $k_j, b_j$  为待求二项式系数.

表2 不同行复原波长与输入波长的比较  
Table 2. Input wavelength and reconstructive wavelength in different line.

输入波长/nm	所取行数复原波长/nm					
	1行	100行	200行	300行	400行	500行
543.5	541.866	549.189	556.712	564.444	569.719	577.819
594.1	597.647	606.567	615.757	622.040	631.709	638.324
612.0	618.883	628.453	635.000	645.079	651.978	659.027
632.8	645.079	651.978	659.020	669.890	677.333	684.943

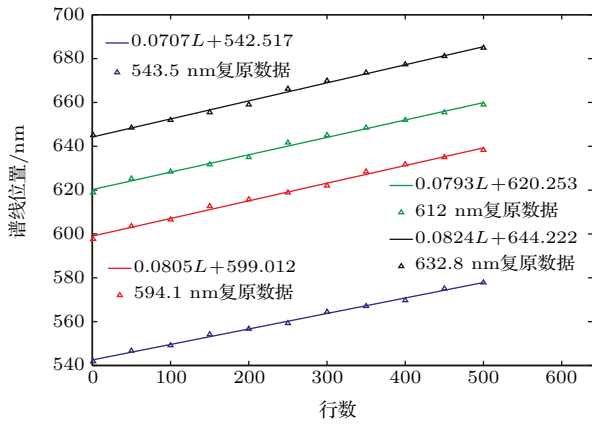


图7 不同波长下复原谱线位置随行变化示意图

Fig. 7. Spectral line position as function of line number.

由图7可知, 谱线位置随行的变化趋势可以很好地利用线性的方式进行拟合, 对于4组激光器不同的入射波长, 拟合系数中斜率系数变化非常缓慢, 而截距变化较为剧烈. 取斜率系数的平均值, 即

$$k_{Mid} = (0.0707 + 0.0805 + 0.0793 + 0.0824)/4 = 0.0782, \quad (9)$$

$k_{Mid}$  为平均斜率, 在此条件下, 通过公式  $\lambda_{Same} = \lambda_{Rec} - k_{Mid}L$  可以得到不同行下截距  $\lambda_{Same}$  的值, 列于表3.

通过表3我们可以得到截距  $\lambda_{Same}$  随行变化的规律, 用(10)式进行拟合:

$$\lambda_{Same} = k_j L + b_j, \quad (10)$$

表3 不同波长下截距的比较  
Table 3.  $\lambda_{Same}$  in different line.

输入波长/nm	所取行数截距 $\lambda_{Same}$					
	1行	100行	200行	300行	400行	500行
543.5	541.788	541.365	541.065	540.974	538.426	538.702
594.1	597.568	598.743	600.110	598.570	600.416	599.207
612.0	618.804	620.630	619.353	621.609	620.685	619.910
632.8	645.001	644.155	643.380	646.419	646.039	645.826

其中,  $j = 1, 2, 3, 4; k_j, b_j$  为待求二项式系数.

由图8可知,  $\lambda_{Same}$  随行变化的线性拟合度很高, 且每一组波长下, 拟合得到的斜率系数  $k_j$  接近于0, 这与我们设想中对  $\lambda_{Same}$  随行变换缓慢的要求一致. 接下来, 只需求出  $\lambda_{Corrected} = k_{Last} \lambda_{Same} + b_{Last}$  中的系数  $k_{Last}, b_{Last}$ , 即可以完成用于谱线位置定标的方程组. 以激光器的输入的4个标准波长及每个波长下  $\lambda_{Same}$  的平均值作为拟合的输入变量, 可以求出(7)式的系数, 因此(6), (7)式最终可以写为

$$\lambda_{Same} = \lambda_{Rec} - 0.0782L, \quad (11)$$

$$\lambda_{Corrected} = 0.8543\lambda_{Same} + 81.774. \quad (12)$$

由图9可以看出, 拟合曲线与理想波长非常符合, 说明了谱线位置定标令人满意. 图10为谱线位置定标等式对不同行干涉图数据复原的谱线位置的定标结果, 相比于原理修正定标方法, 不同输入波长的谱线位置精度都有了大幅的提升, 如表1所列, 4组激光器输入波长的定标误差均方根平均值下降至0.9178, 优于原理修正的定标结果. 但是必须看到, 该方法的普适性较低, 根据新的仪器的数据特点, 定标方程组系数或所满足的关系式需要重新确定. 尽管如此, 这种化繁为的思想往往能大幅提高定标效率且精度俱佳, 值得借鉴.



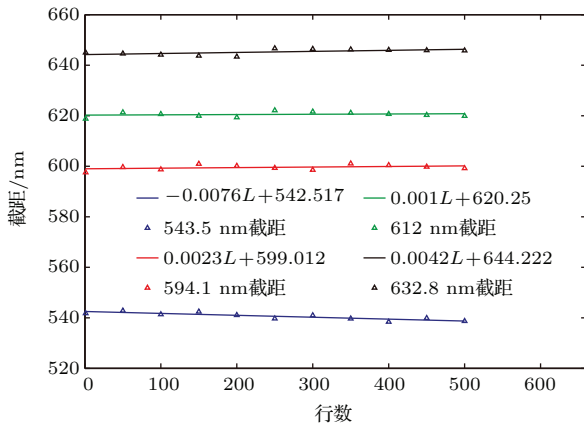


图 8 不同波长下截距随行变化示意图

Fig. 8.  $\lambda_{\text{Same}}$  as function of line number.

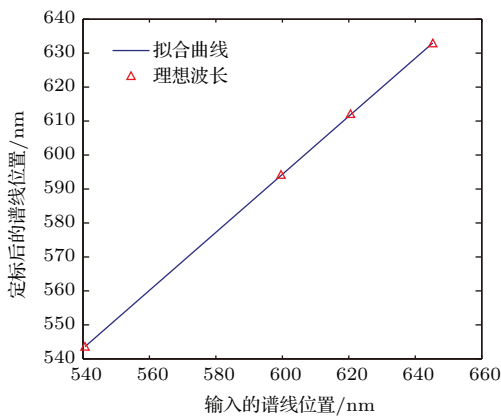


图 9 拟合曲线与实际值比较

Fig. 9. Comparison between curve fitting result and  $\lambda_{\text{Corrected}}$ .

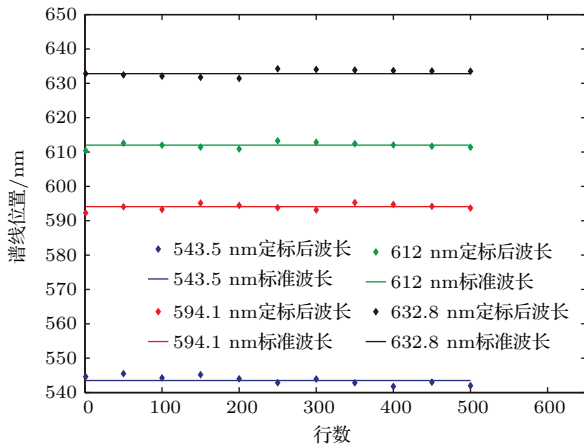


图 10 复原的谱线与标准谱线随行变化示意图

Fig. 10. Comparison between input wavelength and calibration wavelength.

## 4 结 论

本文对偏振干涉成像光谱仪谱线位置定标开展了研究, 针对傅里叶变换后谱线位置随行发生漂

移的现象, 提出了两种具有代表性的谱线位置实验室定标方法, 并给出了定标结果及对比.

1) 原理修正定标方法, 从干涉型成像光谱仪的原理出发, 阐述了谱线位置出现误差的原因, 并给出了通过确定  $(\text{Position}1_{(i)}, \Delta\sigma_{\text{best}(i)})$  进行逐行谱线位置定标的方法, 提高了谱线位置精度. 对于给定的四组激光器标准波长, 谱线位置均方根误差平均值由定标前的 28.3914 下降至 5.5371, 该方法对干涉型成像光谱仪具有普适性. 在无色散系统中各波长都有较高的定标精度, 而在色散系统中, 根据  $\text{Position}1_{(i)}$  的定标波长选择不同, 长波与短波的定标精度存在差异. 在本研究中, 长波的定标精度优于短波.

2) 数据处理定标方法大幅提升了定标精度, 谱线位置均方根误差由定标前的 28.3914 下降至 0.9178, 且实施办法简单, 只需提供复原得到的谱线位置及行数, 代入定标方程组, 即可得到修正波长. 该方法化繁为简的思想值得借鉴, 即是变化的量通过算法转移为缓变量, 再建立缓变量与标准值之间的关系, 这种方法通常也能大幅提高定标效率, 且精度俱佳.

该研究为干涉型成像光谱仪的设计、研制、调试和工程化提供了重要的理论依据和实践指导.

## 参考文献

- [1] Zhang C M, Huang W J, Zhao B C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5479 (in Chinese) [张淳民, 黄伟健, 赵葆常 2010 物理学报 **59** 5479]
- [2] Justice C O, Vermote E, Townshenel J R G, Defries R, Roy D P, Hall D K 1998 *Geosci. Remote Sens.* **36** 1228
- [3] Rast M, Bezy J L 1999 *Inter. J. Remote Sens.* **20** 1681
- [4] Cutter, Mike A, Johns, Lisa S, Lobb, Dan R, Williams T L, Settle J J 2004 *Imaging Spec. IX. Proc. SPIE* **5159** 392
- [5] Zhao B C, Yang J F, Chang L Y, Chen L W, He Y H, Xue B 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 479 (in Chinese) [赵葆常, 杨建峰, 常凌颖, 陈立武, 贺应红, 薛彬 2009 光子学报 **38** 479]
- [6] Rafert J B, Sellar R G, Blatt J H 1995 *Appl. Opt.* **34** 7228
- [7] Tang Y H, Qin L, Gao H Y, Zhu C, Wang D Y 2011 *Opt. Commun.* **284** 2672
- [8] Ai J J, Zhang C M, Gao P, Jia C L 2013 *Opt. Commun.* **298** 46
- [9] Smith W H, Hammer P D 1996 *Appl. Opt.* **35** 2902
- [10] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 192 (in Chinese) [张淳民, 赵葆常, 相里斌 2001 光学学报 **21** 192]

- [11] Li Z W, Xiong W, Shi H L, Wang X H, Ye H H, Wei Q Y, Qiao Y L 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0430002-1 (in Chinese) [李志伟, 熊伟, 施海亮, 王先华, 叶函函, 韦秋叶, 乔延利 2014 光学学报 **34** 0430002-1]
- [12] Wang M Z, Yan L, Yang B, Gou Z Y 2013 *Spectrosc. Spect. Anal.* **33** 2280 (in Chinese) [王明志, 晏磊, 杨彬, 勾志阳 2013 光谱学与光谱分析 **33** 2280]
- [13] Zhao B C, Yang J F, Xue B, Qiao W D, Qiu Y H 2010 *Acta Photon. Sin.* **39** 769 (in Chinese) [赵葆常, 杨建峰, 薛彬, 乔卫东, 邱跃洪 2010 光子学报 **39** 769]
- [14] Gao J, Ji Z Y, Cui Y, Shi D L, Zhou J S, Xiang L B, Wang Z H 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 2853 (in Chinese) [高静, 计忠瑛, 崔燕, 石大莲, 周锦松, 相里斌, 王忠厚 2009 光子学报 **38** 2853]
- [15] Liu Q Q, Zheng Y Q 2012 *Chin. Opt.* **5** 566 (in Chinese) [刘倩倩, 郑玉权 2012 中国光学 **5** 566]
- [16] Anderson J M 1999 *Int. J. Remote Sens.* **20** 535
- [17] Julia C J, Micheal W K, Maryn G S, Eustace L D 2011 *Appl. Opt.* **50** 1170
- [18] Micheal W K, Eustace L D 2012 *Opt. Express* **20** 17973
- [19] Kim J H, Jae H H, Jichai J 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 3413
- [20] Mu T K, Zhang C M, Jia C L, Ren W Y 2012 *Opt. Express* **20** 18194
- [21] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [袁志林, 张淳民, 赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]
- [22] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C, Zha X W 2003 *Opt. Commun.* **227** 221
- [23] Ai J J, Zhang C M, Jia C L, Gao P 2013 *Optik* **124** 5751
- [24] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** 815
- [25] Zhang C M 2010 *Study on Interference Imaging Spectroscopy* (Beijing: Science Press) p51 (in Chinese) [张淳民 2010 干涉成像光谱技术 (北京: 科学出版社) 第 51 页]
- [26] He J, Zhang C M 2005 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7** 613
- [27] Jian X H, Zhang C M, Zhang L, Zhao B C 2010 *Opt. Express* **18** 5674
- [28] Jian X H, Zhang C M, Zhu B H, Ren W Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6131 (in Chinese) [简小华, 张淳民, 祝宝辉, 任文艺 2010 物理学报 **59** 6131]
- [29] Zhang C M, Jian X H 2010 *Opt. Lett.* **35** 366
- [30] Ren W Y, Zhang C M, Jia C L, Mu T K, Li Q W, Zhang L 2013 *Opt. Lett.* **38** 1295
- [31] Mu T K, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Opt. Commun.* **282** 1699

# Study on the methods of calibrating spectral line position of interference imaging spectrometer\*

Wei Yu-Tong<sup>1)2)†</sup> Liu Shang-Kuo<sup>3)</sup> Yan Ting-Yu<sup>1)2)</sup> Li Qi-Wei<sup>1)2)</sup>

1) (School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (Institute of Space Optics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (Xi'an Institute Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

( Received 10 November 2015; revised manuscript received 12 January 2016 )

## Abstract

The principle of interference imaging spectrometer is presented. According to the drift of recovery spectral line position, two representative methods of calibrating the laboratory spectral line position are proposed, and the calibration results and their comparative analyses are given. One method of calibration is to correct the principle, which embarks from parameter selection of interference imaging spectrometer and the analysis of the reason why the spectral line position is drifted. Aiming at the problem that the position of spectral line changes with row, the correction scheme is given to improve the accuracy of spectral line position. For four given laser wavelengths, which are 543.5 nm, 594.1 nm, 612 nm, and 632.8 nm, the root-mean-square (RMS) error of spectral line position is reduced from 28.3914 to 5.5371 after calibration. For the interferometer system which has no dispersion, the accuracy of calibration is better than the dispersion system, and can be the same at all detected wavelengths. In this article, the calibration accuracy of long wave is better than that of short wave, which is dependent on the selection of the initial correction wavelength. This method achieves a kind of universality for interference imaging spectrometer and its calibration parameters provide a convenient way to analyze the instrument indexes. Another calibration method is data processing. It makes up the deficiencies of the method mentioned above: a large number of data are needed and the effect of calibration at short wave is not good enough. The RMS error of spectral line position is reduced to 0.9178, which proves that the calibration has a really high precision. This method is simple and can correct all the detected wavelengths and spectral lines by using two united formula. Though this method is not applicable for all the interference imaging spectrometers, the idea that makes hard things simple is deserving of our attention. We can use it in many other fields. The essence of the method is to change a variable quantity into a slowly varying quantity by algorithms, and then establish the relationship between the slowly varying quantity and the standard value. This idea can always make a substantial increase in efficiency of calibration and has a satisfied accuracy. Each of the two methods has advantages and disadvantages: which method we choose to use is dependent on the effect we want to achieve, and it is better to make their combination. This study provides a theoretical and practical guidance for study, design, modulation, experiment and engineering of interference imaging spectrometers.

**Keywords:** spectral line position calibration, correction of principle, data processing, revision by line

**PACS:** 06.20.fb, 07.05.Kf, 07.60.-j, 42.30.Kq

**DOI:** [10.7498/aps.65.080601](https://doi.org/10.7498/aps.65.080601)

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41530422), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61540018, 61275184, 61405153), the National Major Project (Grant No. 32-Y30B08-9001-13/15), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012AA121101), and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20130201120047).

† Corresponding author. E-mail: [helln7@sina.com](mailto:helln7@sina.com)