

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于最小二乘图像坐标修正的中阶梯光谱仪谱图还原算法

欧阳羽轩, 傅晓, 段发阶, 王宽, 吴靓昕

引用本文:

欧阳羽轩, 傅晓, 段发阶, 等. 基于最小二乘图像坐标修正的中阶梯光谱仪谱图还原算法[J]. 光电工程, 2024, 51(7): 240134.

Ouyang Y X, Fu X, Duan F J, et al. Spectral reduction algorithm for echelle grating spectrometer based on least-squares image coordinate correction[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(7): 240134.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240134>

收稿日期: 2024-06-07; 修改日期: 2024-08-01; 录用日期: 2024-08-02

相关论文

An inversely designed integrated spectrometer with reconfigurable performance and ultra-low power consumption

Ang Li, Yifan Wu, Chang Wang, Feixia Bao, Zongyin Yang, Shilong Pan

Opto-Electronic Advances 2024, 7(8): 240099 doi: [10.29026/oea.2024.240099](https://doi.org/10.29026/oea.2024.240099)

Towards integrated mode-division demultiplexing spectrometer by deep learning

Ze-huan Zheng, Sheng-ke Zhu, Ying Chen, Huanyang Chen, Jin-hui Chen

Opto-Electronic Science 2022, 1(11): 220012 doi: [10.29026/oes.2022.220012](https://doi.org/10.29026/oes.2022.220012)

Ultrahigh-resolution on-chip spectrometer with silicon photonic resonators

Long Zhang, Ming Zhang, Tangnan Chen, Dajian Liu, Shihan Hong, Daoxin Dai

Opto-Electronic Advances 2022, 5(7): 210100 doi: [10.29026/oea.2022.210100](https://doi.org/10.29026/oea.2022.210100)

基于直接散射光谱的多环境要素激光遥感方法

郭圆新, 梁琨, 徐杨睿, 赵延鹏, 王元庆, 王蓓

光电工程 2024, 51(3): 240003 doi: [10.12086/oe.2024.240003](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240003)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



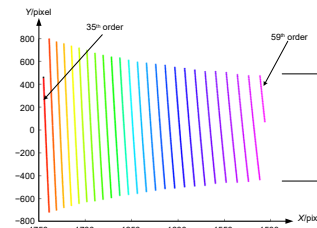
Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240134

基于最小二乘图像坐标修正的中阶梯光谱仪谱图还原算法

欧阳羽轩¹, 傅 骁^{1*}, 段发阶¹, 王 宽¹, 吴靓昕²¹天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072;²中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002

摘要: 中阶梯光谱仪具有交叉色散特征, 二维谱图还原是决定其波长测量准确性的关键环节, 但是环境变化、加工装调等引起的光斑坐标变化对谱图还原精度造成严重影响。本文提出了一种基于最小二乘图像坐标修正的中阶梯光谱仪谱图还原算法, 首先提取校准汞灯光源多波长光斑质心坐标, 利用理论像点和实际像点坐标构建系数矩阵, 通过最小二乘法估计获得二维像面的平移、缩放、旋转系数, 再采用多项式拟合减小残差影响, 实现不同波长光斑的图像坐标修正, 进而实现波长精确解算。实验结果显示, 该算法能有效提高中阶梯光谱仪的谱图还原精度, 在模拟较大装调误差条件下, 修正后坐标与理想坐标偏差小于 0.6 个像元, 证明了该算法具有较高的精度。

关键词: 光谱学; 光谱仪; 二维光谱图; 质心提取; 谱图还原**中图分类号:** O433.4**文献标志码:** A

欧阳羽轩, 傅骁, 段发阶, 等. 基于最小二乘图像坐标修正的中阶梯光谱仪谱图还原算法 [J]. 光电工程, 2024, 51(7): 240134
Ouyang Y X, Fu X, Duan F J, et al. Spectral reduction algorithm for echelle grating spectrometer based on least-squares image coordinate correction[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(7): 240134

Spectral reduction algorithm for echelle grating spectrometer based on least-squares image coordinate correction

Ouyang Yuxuan¹, Fu Xiao^{1*}, Duan Fajie¹, Wang Kuan¹, Wu Jingxin²¹The State Key Lab of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²China Aerospace Hunan Power Machinery Research Institute, Zhuzhou, Hunan 412002, China

Abstract: The echelle grating spectrometer has cross-dispersion characteristics, and two-dimensional spectral map reduction is the key link to determine its wavelength measurement accuracy, but the changes of spot coordinates caused by environmental changes, processing and mounting have a serious impact on the accuracy of spectral map reduction. In this paper, a spectrum reduction algorithm based on least-squares image coordinate correction is proposed for the middle-step spectrometer. Firstly, the center-of-mass coordinates of the multi-wavelength spot of the calibrated mercury lamp light source are extracted, and the coefficient matrix is constructed by using the

收稿日期: 2024-06-07; 修回日期: 2024-08-01; 录用日期: 2024-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2241265, 92360306, 52205573, 61971307, 62231011); 航空科学基金项目 (2022Z060048001); 中国博士后科学基金项目 (2022M720106); 装备预研教育部联合基金项目 (8091B022144); 国防科技重点实验室基金项目 (6142212210304); 广东省重点研发计划项目 (2020B0404030001); 霍英东教育基金会资助项目 (171055); 青年人才托举工程 (2021QNRC001)

*通信作者: 傅骁, fuxiao215@tju.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

theoretical and actual image point coordinates. The translation, scaling, and rotating coefficients of the two-dimensional image plane are obtained by the least-squares estimation method, and then a polynomial fitting is adopted to reduce the influence of residuals, to achieve the correction of the image coordinates of the spot at different wavelengths, and then achieve the accurate resolution of wavelength, and realize the wavelength accurate solving. The experimental results show that the algorithm can effectively improve the spectral image reduction accuracy of the middle-step spectrometer, and the deviation of the corrected coordinates from the ideal coordinates is less than 0.6 image element under the condition of simulating larger mounting errors, which proves that the algorithm has high accuracy.

Keywords: spectroscopy; spectrometer; two-dimensional spectrogram; centroid extraction; spectrogram reduction

1 引言

现代光谱仪器发展的趋势是小型化^[1]、轻量化、便携化与高分辨率化^[2]。传统光谱仪通过增加光栅刻线密度或提高系统焦距的方式实现更高的分辨率^[3], 然而提高光栅刻线密度的工艺水平难以突破, 且提高系统焦距的方法与光谱仪小型化的发展趋势相悖。中阶梯光谱仪通过增加光栅倾斜角度从而获得更高的衍射级次, 可以在小光栅刻线密度与不改变系统焦距的前提下实现高光谱分辨率^[4], 被越来越多地应用在天文^[5]、工业^[6]、农业^[7]、化工^[8]等领域。

中阶梯光谱仪的核心分光元件是中阶梯光栅, 中阶梯光栅工作级次很高, 通过中阶梯光栅色散的光谱往往存在严重的混叠现象, 需要引入辅助色散元件将混叠的光谱区分开, 这种交叉色散的方式会在像面上形成二维的光谱图, 所以二维光谱信息处理方法是中阶梯光谱仪的核心。将二维光谱图还原成波长信息的方法称为谱图还原算法^[9], 通过将像面坐标与波长建立数学关系, 从而实现宽波段、多元素的瞬态直读。Liu 等人采用光线追迹方法对二维光谱图进行谱图还原, 通过数学公式计算不同波长所对应的二维坐标^[10]。宁春丽等人通过使用软件光线追迹结合单色波长标定的方法提高谱图还原精度^[11], 将还原误差控制在 2 个像元以内。Finkelstein 通过分析同一级次不同波长的光谱分布规律, 使用插值法对同一级次的波长进行拟合^[12]。McNeill 在 Finkelstein 研究基础上将插值拟合法应用到阶梯光栅的谱图中^[13]。朱继伟等人将插值拟合法扩展到中阶梯光谱仪的二维光谱图中, 在光栅色散与棱镜色散方向分别进行插值多项式拟合^[14], 还原精度达到 0.02 nm。唐玉国等人对谱图还原算法的标定速度进行优化, 提出偏差法进行谱图还原, 通过建立近似模型降低谱图还原的计算量, 在实现 0.01 nm

高精度的同时提高了全谱标定速度^[15]。傅晓在偏差法的基础上, 结合光学系统成像误差分析, 提出了一种基于最小二乘法的标定法^[16], 可以在少量标定波长数据样本的前提下对中阶梯光谱仪进行误差修正, 在仅使用 6 个标定波长谱图坐标数据的前提下实现谱图坐标修正最大误差小于 1 个像元。崔涛、尹禄等人对谱图还原算法的速度和精度进行了均衡, 通过将傅晓提出的标定法与唐玉国使用的偏差法相结合, 在标定误差控制在 3 个像元以内的前提下将谱图还原模型建立时间降低到 0.94 s^[17]。

本文提出了一种基于最小二乘与多项式拟合的谱图还原算法, 优先考虑谱图还原的精度, 以汞灯的特征波长成像结合 OpticStudio 软件光线追迹, 建立实际成像与理想成像的误差修正与补偿模型。对修正后的光斑坐标进行波长估算, 从而建立二维光谱图像素坐标与波长的谱图还原模型。经验证, 该算法还原精度高, 运算便捷, 仅需要少量特征波长就可以实现高精度标定, 针对系统加工公差、装调误差、环境因素变化的标定误差在 0.6 个像元以内, 可以适用于各种不同型号的中阶梯光谱仪与不同的使用场景。

2 实验仿真

2.1 中阶梯光栅光谱仪

本文谱图还原算法所采用的中阶梯光谱仪的光路结构是结合 Littrow 结构与 C-T 结构的反射式交叉色散结构。如图 1 所示: 实验光束 (蓝色光线) 从小孔入射, 经由离轴抛物面镜进行准直后以设定好的准里特洛偏转角入射到中阶梯光栅, 中阶梯光栅将平行光束在子午方向进行一次色散, 色散后的光线通过反射棱镜在弧矢方向进行二次色散, 交叉色散后的光线 (不同颜色代表不同波长) 由聚焦球面镜聚焦, 聚焦后的

光束通过柱面透镜修正像散, 在像面上呈现二维的梳状光谱图。

设计该中阶梯光谱仪的主要参数有: 中阶梯光栅闪耀角、中阶梯光栅常数、色散棱镜顶角、聚焦球面镜口径、消像散柱面透镜口径等, 具体参数如表 1 所示。

为更加直观地体现中阶梯光栅光谱仪交叉色散成像的效果, 对可见光波段的波长 380 nm~780 nm 进行仿真, 得到其在像面上呈现的二维光谱图如图 2 所示, 图中最左侧梳状图代表衍射级次为 35 次的红色可见光在像面上成像的位置, 最右侧梳状图代表衍射级次为 59 次的紫色可见光在像面上成像的位置。对于该中阶梯光谱仪来说, 波长越长, 级次越小, 成像位置越偏左。

2.2 基于最小二乘和多项式拟合的谱图还原算法

谱图还原是将像面光斑坐标与光源波长、级次建

立数学模型的过程, 将二维光谱图转化为可供光谱分析的一维光谱图。在实际应用场景中, 由于温度、气压的变化, 光学元件在搬运、组装过程中的装调误差及探测器发生滚转等因素影响, 像面光斑与理论光斑位置之间存在偏差, 无法直接进行谱图还原。为了避免这些误差, 需要对实际成像的二维谱图光斑进行质心提取和坐标修正。具体流程如图 3 所示。

2.2.1 光斑的质心提取

中阶梯光栅光谱仪的二维光谱图包含了全部的光谱信息, 信息量十分庞大, 在图像产生的过程中, 由于光学系统成像的像差、探测器产生的随机电流噪声和暗电流噪声等因素的影响, 实际成像的光斑并不是单一的像素点, 而是占据多个像元的弥散斑。且中阶梯光谱仪二维光谱图存在信噪比低、图像不确定性强、有效光斑灰度差异大、光谱响应函数非对称等问题。

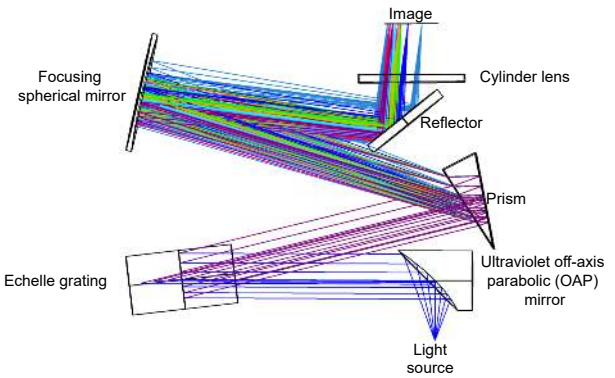


图 1 中阶梯光栅光谱仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the echelle grating spectrometer

表 1 中阶梯光谱仪设计参数

Table 1 Echelle grating spectrometer design parameters	
Parameter	Value
Raster etching density/(l·mm ⁻¹)	79
Grating flashing angle/°	63
Grating deflection angle/°	7
Prismatic peak angle/°	18
Curvature of a spherical mirror/mm	300
Cylindrical lens curvature/mm	34.5
Detector full resolution	2048×2048
Detector pixel size/μm ²	11×11

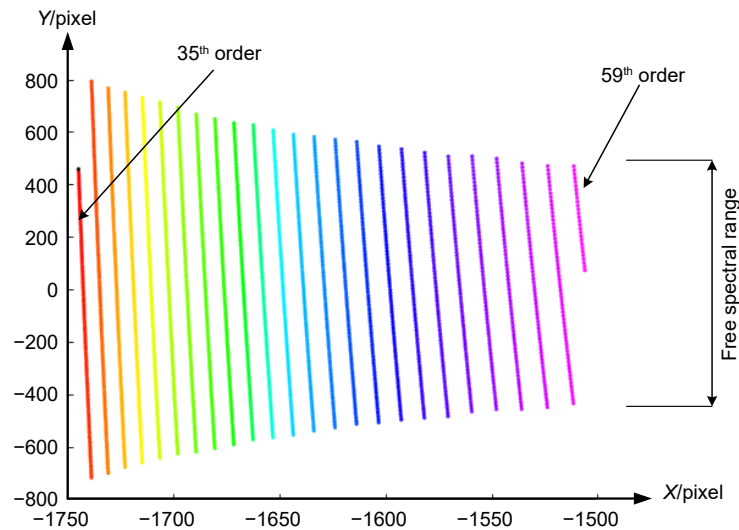


图 2 自由光谱区内中阶梯光谱仪二维光谱图

Fig. 2 Two-dimensional spectrogram of the echelle grating spectrometer in the free spectrum region

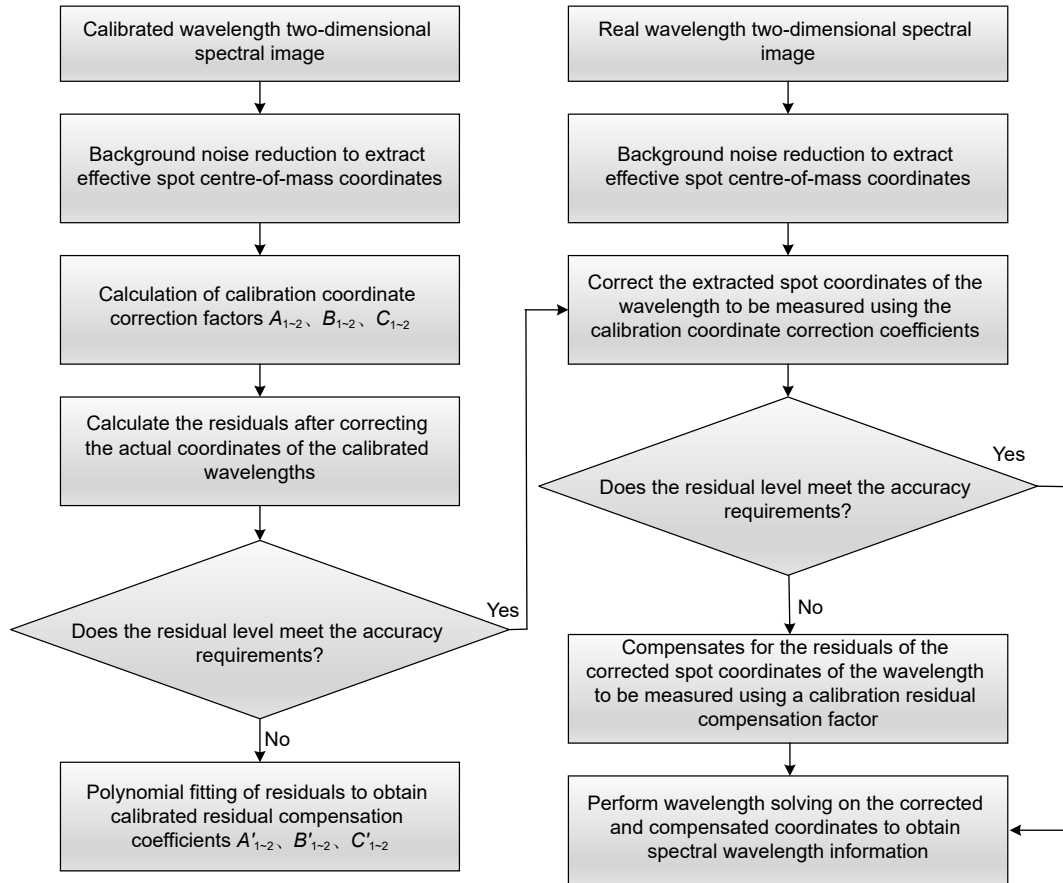


图 3 谱图还原流程图

Fig. 3 Spectral reduction flowchart

这些误差会给谱图还原的精度造成影响, 如图 4 所示。

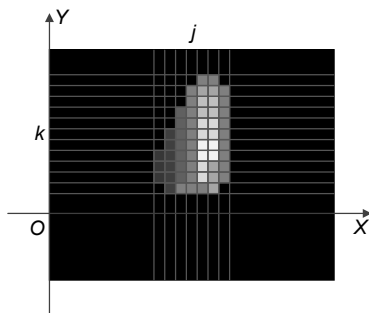


图 4 像面光斑示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the image plane spot

为降低上述因素带来的误差, 获得相对准确的实际光斑坐标, 需要对谱图进行背景降噪, 并对降噪后的图像中的光斑进行质心提取。可以通过仿真对理想成像像面添加随机噪声, 通过降噪, 提取质心的操作对质心提取精度进行评估, 具体过程在第三章详细说明。

由于中阶梯光谱仪所成的二维光谱图光斑在像面上是孤立的, 所以可以对降噪后的图像进行边缘检测, 获取光斑边缘位置信息, 对边缘图像进行形态学操作, 标记连通域, 对原图对应连通域内的像元灰度值进行映射并使用灰度权重法进行质心提取。假设第 i 个波长对应的光斑区域为 P_i , 此光斑第 k 行、第 j 列的灰度值为 I_{kj} , 将其灰度值作为像素权重在整个区域内进行卷积运算, 则该光斑的质心坐标为

$$S(x_i, y_i) = \left[\frac{\sum_{(k,j) \in P_i} x_{kj} I_{kj}}{\sum_{(k,j) \in P_i} I_{kj}}, \frac{\sum_{(k,j) \in P_i} y_{kj} I_{kj}}{\sum_{(k,j) \in P_i} I_{kj}} \right]. \quad (1)$$

2.2.2 谱图坐标修正

如图 5 所示, 中阶梯光栅光谱仪在水平与垂直方向的色散互不干扰且相互独立, 其中: W 为像面尺寸, O 为球面聚焦镜中心, O' 为二维光谱图的原点, O'' 为像面中心, f 为系统焦距, θ_x 、 θ_y 分别是水平棱镜色散角和垂直光栅衍射偏转角。点 S 是第 i 个波长通过

光线追迹法计算出的在像面上的理论位置, 点 S' 是点 S 实际测量的位置 (红色像点)。

常规谱图还原模型中坐标原点应该在像面中心即 O'' 处^[16], 中阶梯光栅衍射方向在 Y 方向上, 中心处于衍射级次的中心位置, 对应中阶梯光栅闪耀角, 波长的求解计算相对简单。光栅色散方向在 X 方向上, 波长与色散角的关系是非线性的, 寻找色散角中线对波长解算并无帮助, 反而增加算法难度, 因此在 X 方向选取 O' 作为像面坐标原点, 使得波长下限图像边界重合, 可以更好地利用像面的横向像元。

Y 方向与 X 方向坐标分量为

$$x_i = OO' \tan \theta_x = f \tan \theta_x, \quad (2)$$

$$y_i = OO' \tan \theta_y = f \tan \theta_y, \quad (3)$$

其中: x_i 是像点在水平方向移动的分量, y_i 是像点在垂直方向移动的分量, 它们都是关于色散角和系统焦距的函数, 而色散角是关于波长 λ 的函数:

$$S(x_i, y_i) = S[f(\lambda_i), g(\lambda_i)]. \quad (4)$$

也可以认为波长是关于像点坐标 x_i 和 y_i 的函数:

$$\lambda_i = f[S(x_i, y_i)]. \quad (5)$$

然而, 棱镜折射率受温度、气压的影响, 且实际光路装调误差无法避免, 如图 5 所示, 实际测得光斑坐标为 $S'(x'_i, y'_i)$, 此时根据理论模型解算波长为

$$\lambda'_i = f[S(x'_i, y'_i)]. \quad (6)$$

显然, 用实际光斑坐标进行波长解算与理论坐标波长解算直接存在较大误差, 为了修正这一偏差, 可以对像面坐标进行修正。由图 5 可知, 实际成像 $S'(x'_i, y'_i)$ 与理论成像 $S(x_i, y_i)$ 之间存在差异。如果对实际成像坐标进行修正, 即:

$$S(x_i, y_i) = g[S(x'_i, y'_i)]. \quad (7)$$

将修正后的坐标带入波长解算函数就可以得到真实的波长:

$$\lambda_i = f\{g[S(x'_i, y'_i)]\}. \quad (8)$$

由于坐标仅有 x 与 y 两个变量, 理论上只需要找到 2 组已知波长的像点坐标和实际坐标就可以对坐标进行修正。但是这种方法也是不完备的, 它仅考虑了像点发生平移的情况。在实际测量过程中, 当传感器发生倾斜或系统焦距出现偏差时, 实际成像相当于理论成像发生了缩放; 当传感器像面发生滚转时, 实际成像相当于理论成像发生了旋转, 这些偏差无法通过单一的平移进行修正。因此, 本文提出了一种基于最小二乘、坐标系转换和多项式拟合的谱图还原及波长校准算法, 在降低运算量的同时提高谱图还原精度。

2.2.3 基于最小二乘的谱图坐标修正算法

导致实际像点 $S'(x'_i, y'_i)$ 与理论像点 $S(x_i, y_i)$ 位置不一致的因素有很多, 可以将这些外部因素与内部因素等效为理论像点通过缩放、平移、旋转得到。首先考虑缩放与平移:

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中: a_1 、 a_2 是缩放系数, b_1 、 b_2 是平移系数。设已知波长 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$, 其对应理论像点坐标 $S(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 面阵探测器所测实际像点坐标 $S'(x'_i, y'_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 缩放系数和平移系数可由最小二乘法解得。

然而面阵探测器并不是准确固定的, 在安装过程中像面会产生滚转, 对像点的修正必须考虑旋转因素。根据谱图还原模型可知, 旋转中心为像面的中点 O'' , 并不是像面原点 O' 。需要先将坐标系平移到旋转中

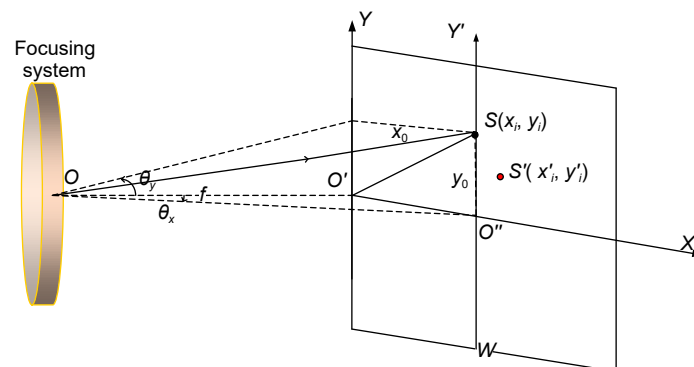


图 5 谱图还原示意图

Fig. 5 Schematic of spectrogram reduction

心再对旋转向量进行修正。将缩放平移式 (9) 扩展到像面滚转情况可以得到:

$$\begin{bmatrix} x'_i - x_0 \\ y'_i - y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中: θ 是旋转角, x_0 、 y_0 是像面滚转中心点坐标, 也可以写成方程组形式:

$$\begin{cases} (x'_i - x_0) = A_1(x_i - x_0) + B_1(y_i - y_0) + C_1 \\ (y'_i - y_0) = A_2(x_i - x_0) + B_2(y_i - y_0) + C_2 \end{cases}. \quad (11)$$

共有 7 个变量需要拟合, 需要至少 7 组已知波长的光斑坐标和实际测试坐标进行标定, 运算量较大。在多数情况中可以简化运算, x_0 与 y_0 的值可以通过实际情况直接获得, 以本文研究光谱仪为例, 图 5 所示旋转中心为面阵传感器相面中心 O'' : $x_0=W/2$, $y_0=0$ 。无需作为变量进行拟合。式 (11) 简化后公式如下:

$$\begin{cases} x_i = A_1x'_i + B_1y'_i + C_1 \\ y_i = A_2x'_i + B_2y'_i + C_2 \end{cases}. \quad (12)$$

将 $\{S'(x'_i, y'_i), i=1, 2, 3, \dots, n\}$ 代入上式, 得到矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x'_2 & y'_2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_n & y'_n & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x'_1 & y'_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & x'_2 & y'_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x'_n & y'_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}. \quad (13)$$

使用式 (14) 解矩阵方程:

$$\min_x \|Ax - b\|_2^2. \quad (14)$$

解得系数矩阵解析解如下:

$$A_1 = \frac{1}{n^4} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n x_i x'_i + \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n y_i x'_i \right) + 1, \quad (15)$$

$$A_2 = \frac{1}{n^4} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n x_i y'_i + \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n y_i y'_i \right) + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n y'_i, \quad (16)$$

$$B_1 = \frac{1}{n^4} \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i x'_i + \sum_{i=1}^n y_i^2 \sum_{i=1}^n y_i x'_i + n^2 \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x'_i \right), \quad (17)$$

$$B_2 = \frac{1}{n^4} \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i y'_i + \sum_{i=1}^n y_i^2 \sum_{i=1}^n y_i y'_i + n^2 \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n y'_i \right), \quad (18)$$

$$C_1 = \frac{1}{n^3} \left(\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i x'_i + \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n y_i x'_i \right) + \sum_{i=1}^n x'_i, \quad (19)$$

$$C_2 = \frac{1}{n^3} \left(\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y'_i + \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n y_i y'_i \right) + \sum_{i=1}^n y'_i. \quad (20)$$

2.2.4 基于多项式拟合的谱图坐标残差补偿算法

实际像元坐标经过修正后的坐标 $S(\hat{x}, \hat{y})$ 与理论像元坐标 $S(x_i, y_i)$ 已经十分相近, 但是仍然存在残差:

$$\begin{cases} \Delta x_i = x_i - \hat{x} \\ \Delta y_i = y_i - \hat{y} \end{cases}. \quad (21)$$

考虑到残差 Δx_i 、 Δy_i 应该是关于波长 λ 函数, 为方便计算, 引入二阶多项式对残差进行拟合:

$$\begin{cases} \Delta x_i = A_1 + B_1 \lambda_i + C_1 \lambda_i^2 \\ \Delta y_i = A_2 + B_2 \lambda_i + C_2 \lambda_i^2 \end{cases}. \quad (22)$$

将数据代入式中得到矩阵:

$$\begin{bmatrix} 1 & \lambda_1 & \lambda_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \lambda_2 & \lambda_2^2 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \lambda_n & \lambda_n^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \lambda_1 & \lambda_1^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \lambda_2 & \lambda_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \lambda_n & \lambda_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta y_n \end{bmatrix}. \quad (23)$$

多项式系数 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 可由式 (14) 解得, 不再赘述, 得到系数解析解:

$$A_1 = \frac{1}{n} \left(n \sum_{i=1}^n \Delta x_i - C_1 \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 - n B_1 \sum_{i=1}^n \lambda_i \right), \quad (24)$$

$$A_2 = \frac{1}{n} \left(n \sum_{i=1}^n \Delta y_i - C_2 \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 - n B_2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \right), \quad (25)$$

$$B_1 = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta x_i - n \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{i=1}^n \Delta x_i - C_1 (n^2 \sum_{i=1}^n \lambda_i^3 - n \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{i=1}^n \lambda_i^2)}{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right)^2}, \quad (26)$$

$$B_2 = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta y_i - n \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{i=1}^n \Delta y_i - C_2 (n^2 \sum_{i=1}^n \lambda_i^3 - n \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{i=1}^n \lambda_i^2)}{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right)^2}, \quad (27)$$

$$C_1 = \frac{(\overline{\lambda_i \Delta x_i} - \overline{\lambda_i} \overline{\Delta x_i})(\overline{\lambda_i^3} - \overline{\lambda_i} \overline{\lambda_i^2}) - (\overline{\lambda_i^2 \Delta x_i} - \overline{\lambda_i^2} \overline{\Delta x_i})(\overline{\lambda_i^2} - \overline{\lambda_i})}{(\overline{\lambda_i^3} - \overline{\lambda_i} \overline{\lambda_i^2})^2 - (\overline{\lambda_i^4} - \overline{\lambda_i^2} \overline{\lambda_i^2})(\overline{\lambda_i^2} - \overline{\lambda_i})}, \quad (28)$$

$$C_2 = \frac{(\overline{\lambda_i \Delta y_i} - \overline{\lambda_i} \overline{\Delta y_i})(\overline{\lambda_i^3} - \overline{\lambda_i} \overline{\lambda_i^2}) - (\overline{\lambda_i^2 \Delta y_i} - \overline{\lambda_i^2} \overline{\Delta y_i})(\overline{\lambda_i^2} - \overline{\lambda_i})}{(\overline{\lambda_i^3} - \overline{\lambda_i} \overline{\lambda_i^2})^2 - (\overline{\lambda_i^4} - \overline{\lambda_i^2} \overline{\lambda_i^2})(\overline{\lambda_i^2} - \overline{\lambda_i})}. \quad (29)$$

对修正后的像点坐标 $S(\hat{x}, \hat{y})$ 进行多项式拟合补偿

后, 得到像点坐标估计值 $\tilde{S}(\tilde{x}, \tilde{y})$, 将其带入任意谱图还原公式进行波长解算, 得到目标波长:

$$\lambda_i = f(\tilde{S}). \tag{30}$$

3 结果与讨论

3.1 谱图背景降噪及质心提取

通过图 3 谱图还原流程图可知, 谱图还原首先需要对拍摄的中阶梯光谱仪二维光谱图进行预处理^[18], 对谱图背景噪声进行降噪处理。而且在对光斑质心的提取过程中也会产生一定的误差, 需要对质心提取的精度进行评估, 如图 6 所示。

从 OpticStudio 软件中导出仿真像面辐照值数据, 通过 Matlab 将数据转化为灰度图像并进行绘制, 以氙灯 922.45 nm 特征波长光斑为例:

其中图 6(a) 是氙灯 922.45 nm 特征波长光斑图像, 图 6(b) 是添加了随机高斯噪声后的光斑图像, 图 6(c) 是使用高斯滤波函数 *imgaussfilt* 对添加随机高斯噪声的谱图进行降噪处理后的图像。对降噪后光斑质心提取给出了两种方法, 图 6(c) 到图 6(d, e) 是通过对降噪后的光斑进行边缘检测, 对边缘检测后的图

像进行形态学操作^[19], 使用 *imdilate* 函数进行膨胀, 使用 *imerode* 函数进行腐蚀以连接边缘, 使用 *bwconncomp* 函数和 *bwboundaries* 函数进行连通域分析后在原始图像图 6(a) 上绘制连通域的边界并使用灰度权重法提取质心^[20]。图 6(c) 到图 6(f, g) 是通过对降噪后光斑 OSTU 二极化, 直接提取二极化后的中心作为光斑质心。

分析汞氙灯 29 个特征波长对应的光斑质心与理想质心的误差, 得到质心提取误差如表 2 所示。

显然, 使用连通域分析的质心提取方法精度更高, 但是速度较慢; 使用 OSTU 二极化中心提取的方法精度较低, 但是速度较快。

表 2 质心提取误差

Table 2 Center of mass extraction error

Error	X/pixel	Y/pixel	Euclidean distance/pixel
MAE	0.39511	0.37941	0.60333
MSE	0.18411	0.23683	0.42094
RMSE	0.42908	0.48665	0.64881
MAE (OSTU)	2.5928	1.3792	3.0394
MSE (OSTU)	7.0404	2.6216	9.662
RMSE (OSTU)	2.6534	1.6191	3.1084

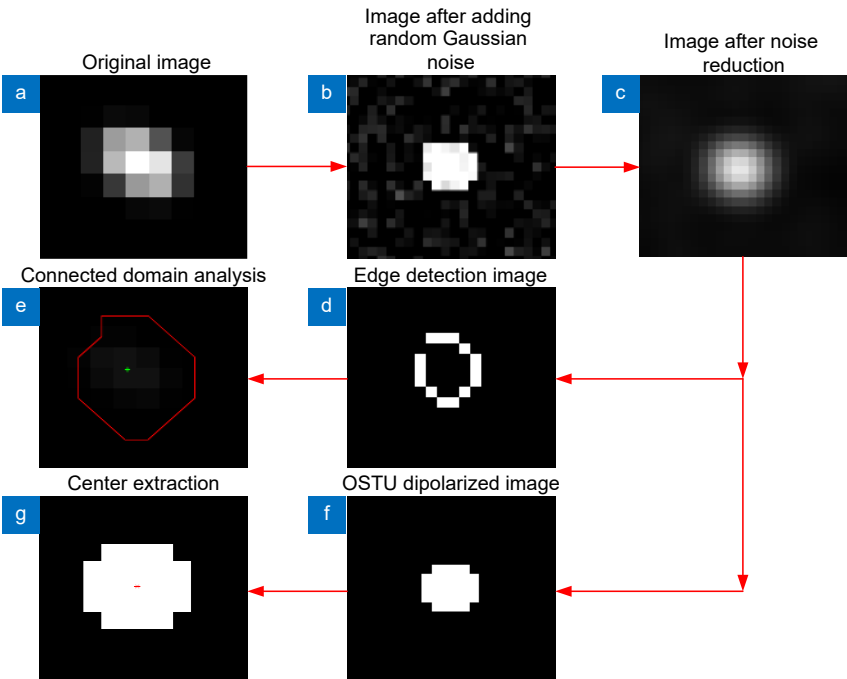


图 6 质心提取示意图。(a) 原始图像; (b) 添加高斯噪声; (c) 背景降噪; (d) 边缘提取; (e) 连通域分析质心提取; (f) OSTU 二极化; (g) 灰度权重质心提取

Fig. 6 Schematic diagram of center of mass extraction. (a) Original image; (b) Addition of Gaussian noise; (c) Background noise reduction; (d) Edge extraction; (e) Connected domain analysis center of mass extraction; (f) OSTU dipolarization; (g) Gray scale weighted center of mass extraction

3.2 汞氙灯特征波长标定仿真

图 7 为理想情况下中阶梯光谱仪对标准汞氙灯光源成像的二维光谱图, 图中标出了汞灯特征波长的光斑位置。

其中, 横坐标 X 与纵坐标 Y 的单位为 mm。通过获取不同特征波长的成像光斑的坐标与照度值, 通过质心提取式 (1) 处理后得到汞氙灯特征波长的理想坐标。

汞灯特征范围波长为 253 nm~579 nm, 氙灯特征波长范围为 696 nm~922 nm。在棱镜色散方向 X 方向上, 波长越长 X 坐标越小呈非线性分布。在光栅色散方向 Y 方向上坐标分布没有规律, 这是因为中阶梯光栅的色散角不仅与波长有关, 还与该波长所处的工作级次有关。在实际的工作环境中, 棱镜的色散率会随着温度、气压等环境因素发生变化。为了验证谱图坐标修正算法的精度, 在实验光路中修改各项光学元件的设计参数, 模拟工件在生产与安装时产生的公差与误差。由于是仿真实验相比于实际情况仍然过于理想, 给各项参数修改的误差量应该大于实际元件生产公差的 2 倍以上。给像面添加明显滚转角度用以测试算法在修正滚转误差方面的效果。修改每次测试时的气温与气压情况, 用以模拟不同的使用环境。表 3 列出了三次实验中各项关键设计参数指标的偏差值。

在光学系统中添加误差后对汞氙灯的 29 个特征波长进行追迹, 分别进行三次实验后将成像二维光谱图与理想成像的二维光谱图对比。以第一次实验为例, 将汞氙灯特征波长理想成像二维光谱图与添加了误差后实际成像的二维光谱图进行对比, 将实际成像光斑调成红色用以与理想成像光斑进行区分, 将两张图合并。

当光学系统参数与实验环境发生变化时, 成像光斑的位置也会发生变化。波长越长, 成像光斑分布越密集, 当两个近红外长波长相近时, 微小的偏差都有可能将一个波长的实验测量光斑坐标与另外一个实验波长的理想仿真光斑坐标更加接近。如图 8 所示, 氙灯波长 922.45 nm 实际成像光斑坐标与氙灯波长 738.398 nm 的理论成像坐标更接近, 氙灯 852.144 nm 成像光斑与氙灯波长 714.704 nm 理论成像坐标更接近。谱图还原时将成像坐标相近的波长混淆, 严重影响谱图还原的精度。图 9 记录了三次实验中汞氙灯的 29 个特征波长的实际光斑坐标与理想情况下理论坐标的差值。

可以看出, 当系统中的光学参数发生变化时, 相同波长的坐标会发生非常大的变化, 在实验中最大 X 坐标偏移量达到了 50 个像元, 最大 Y 坐标偏移量达到了 48 个像元如果将此时测量的坐标当作理想坐标进行波长解算会带来很严重的误差。

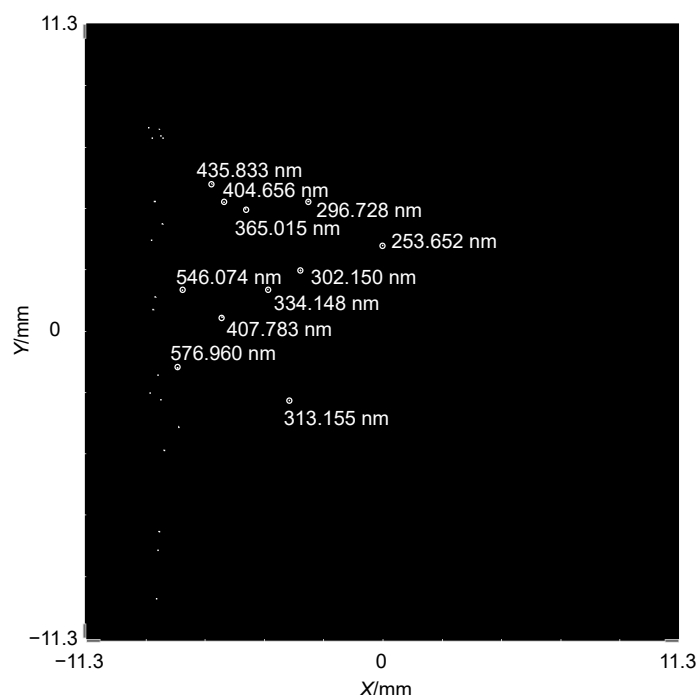


图 7 汞氙灯光源成像二维光谱图

Fig. 7 Two-dimensional spectrogram of mercury-argon light source imaging

表 3 仿真实验光路参数误差值

Factor	Test1	Test2	Test3
Collimated spherical mirror deflection angle difference/°	0.1	0.2	-0.2
Grating flashing angle difference/°	0.2	0.2	-0.2
Grating deflection angle difference/°	0.2	-0.2	0.2
Prismatic peak angle difference/°	0.05	0.05	-0.05
Focusing spherical mirror deflection angle/°	-0.1	0.1	-0.1
Image plane X coordinate difference/mm	0.5	-0.1	0.1
Image plane Y coordinate difference/mm	-0.5	0.1	0.1
Image plane Z coordinate difference/mm	2.0	-1.0	2
Angle of rotation of image plane difference/°	1.5	0	-1.5
Temperature difference/°C	10.0	-10.0	10.0
Barometric pressure difference/ATM	0.5	0	-0.5

3.3 基于最小二乘与多项式拟合的谱图还原算法验证结果

以汞氩灯实际光谱坐标为拟合自变量, 将表 4 将计算的汞氩灯波长理想光谱质心坐标作为拟合目标量带入式 (24)~(29) 计算出拟合系数, 得到表 5。

选取银、铝、硼等 21 种常见元素的特征波长进行仿真验证, 通过软件追迹出所有特征波长的二维光谱图, 图 10 标注了各个光斑所对应的元素种类。

通过对各个元素成像光斑进行质心提取, 获取各个特征波长的理想质心坐标并记录, 如表 6 所示。

在光路中按表 3 所示添加误差后分别进行三次实验, 获取待测波长的实际坐标后通过汞氩灯标定的最小二乘法系数带入式 (12), 得到修正后的待测波长坐标值, 计算修正后光斑质心坐标与理想光斑质心坐标的残差值, 如图 11 所示。

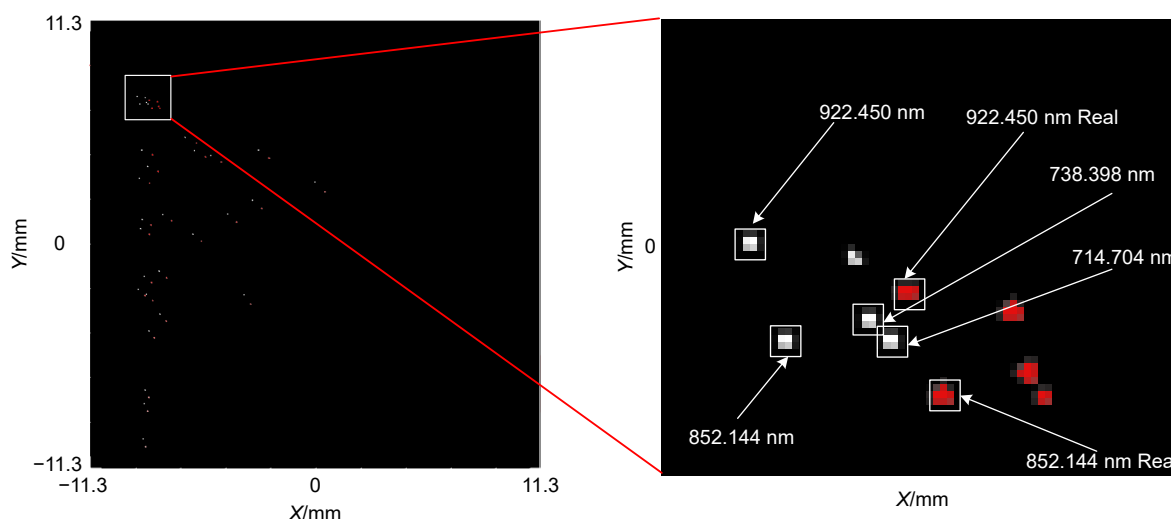


图 8 汞氩灯光源成像光谱对比图

Fig. 8 Comparison of imaging spectrograms of mercury-argon light sources

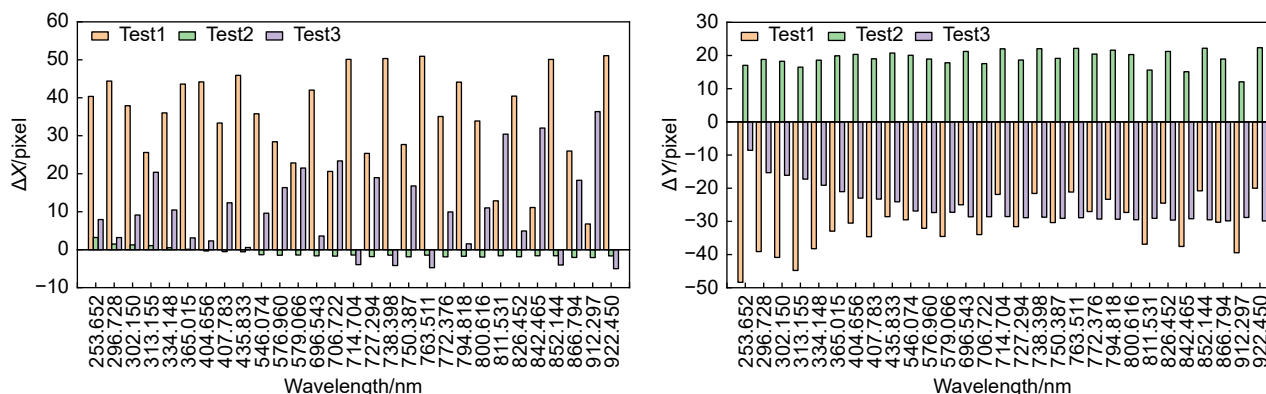


图 9 汞氩灯标定波长谱图坐标偏差

Fig. 9 Common element wavelength coordinate correction residuals

表 4 汞氩灯特征波长光谱信息

Table 4 Spectral information on characteristic wavelengths of mercury-argon lamps

Wavelength/nm	Order of diffraction	X position/pixel	Y position/pixel	Wavelength/nm	Order of diffraction	X position/pixel	Y position/pixel
253.652	88	-1.0108	287.6266	727.294	31	-769.6398	-229.8145
296.728	75	-259.1705	433.7794	738.398	30	-768.3944	653.3849
302.150	74	-285.9167	203.6792	750.387	30	-778.3806	-147.5455
313.155	72	-324.6694	-231.9005	763.511	29	-774.8637	674.6637
334.148	67	-399.4394	138.8264	772.376	29	-787.3103	113.8959
365.015	61	-475.8133	409.3228	794.818	28	-790.2125	433.5014
404.656	55	-549.4312	430.7239	800.616	28	-794.6037	72.0627
407.783	55	-557.1198	47.3395	811.531	28	-775.0149	-670.483
435.833	51	-591.7942	492.492	826.452	27	-800.1515	303.6997
546.074	41	-694.7505	136.294	842.465	27	-778.8817	-732.2836
576.960	39	-710.6427	-123.4383	852.144	26	-798.1824	645.4346
579.066	39	-706.8637	-320.3302	866.794	26	-806.3448	-207.1703
696.543	32	-762.6245	358.3138	912.297	25	-783.509	-894.4498
706.722	32	-757.8462	-397.779	922.450	24	-811.9811	681.0741
714.704	31	-761.3504	645.1947				

此时残差值已经非常小，最大残差约为 1 个像元，基本满足谱图还原精度的需求。考虑到实际使用场景更为复杂多变、仿真数据过于理想等问题，需要对残差进行补偿以进一步提高谱图坐标的精度。将汞氩灯标定波长的残差数据代入式 (26)~(29)，得出残差补偿多项式拟合系数如表 7 所示。

表 5 谱图坐标修正拟合系数

Table 5 Spectral coordinate correction fitting factor

Factor	Test1	Test2	Test3
A_1	0.9986	0.9939	0.9961
B_1	-0.0279	0.0002	0.0261
C_1	-33.6899	-2.9814	-15.0959
A_2	0.0290	0.0043	-0.0262
B_2	0.9876	0.9949	0.9993
C_2	50.1140	-15.7932	8.9989

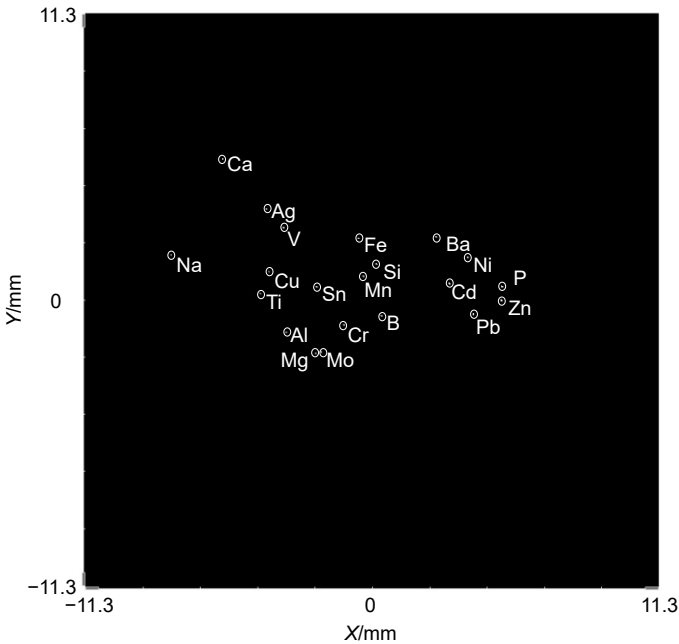


图 10 汞氩灯光源成像二维光谱图

Fig. 10 Two-dimensional spectrogram of mercury-argon light source imaging

使用残差补偿系数对修正后的常见元素光斑坐标进行残差补偿, 计算最终修正坐标与理想成像坐标的误差如图 12 所示。

从谱图坐标修正的结果可以看出, 使用汞氩灯光源作为标定对于中阶梯光谱仪设计波段的谱图修正效果较好, 待测元素特征波长范围 213 nm~588 nm 经过修正与补偿后最大偏差均小于 0.6 个像元。P 元素特征波长为 213.6 nm, Zn 元素特征波长为 213.8 nm, 相差仅为 0.2 nm。从图 8 可以看出, 在近紫外波段的特征波长所成光斑十分密集, 若将未修正前的坐标进行波长解算, 会造成元素的误读。经过修正后, P 元素 Y 方向最大偏差仅为 0.25 个像元, Zn 元素 Y 方向最大偏差仅为 0.4 个像元, 从图 9 可知, 理想情况下

两元素特征波长成像光斑质心坐标在 Y 方向间隔有 47 个像元, 修正后的坐标误差完全可以将相近元素的特征谱线进行区分。但是在实际实验的过程中, 由于装调误差与器件的面性误差, 可能会出现像差过大, 质心提取精度下降的问题, 不同波长的灰度值差距很大, 在背景去除的过程中可能会将一些强度较弱的光斑去除, 导致信息缺失等问题。

4 结 论

本文提出了一种基于最小二乘和多项式拟合的中阶梯光栅光谱仪二维光谱图光斑坐标修正方法。与传统的谱图还原方法对比, 该算法作为一种谱图还原坐标信息预处理方法, 具有运算量更低, 还原精度高,

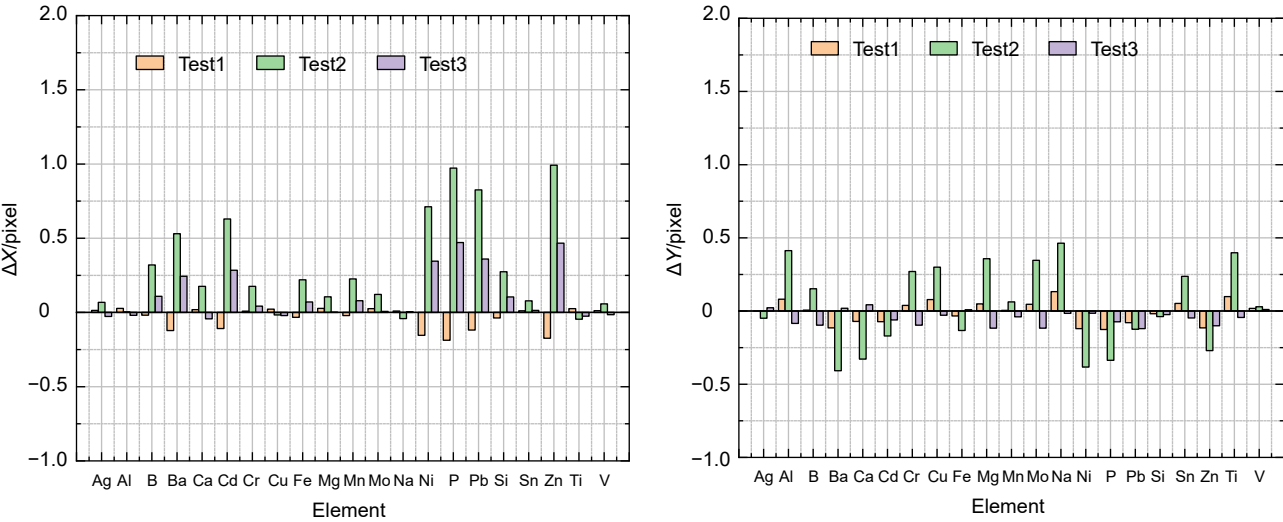


图 11 常见元素波长坐标修正残差
Fig. 11 Common element wavelength coordinate correction residuals

表 6 常见元素光谱坐标
Table 6 Spectral coordinates of common elements

Wavelength/nm	Type of elements	X position/pixel	Y position/pixel	Wavelength/nm	Type of elements	X position/pixel	Y position/pixel
328.0	Ag	-379.2747	325.992	281.6	Mo	-183.6679	-186.0624
308.2	Al	-308.3616	-116.4983	588.9	Na	-719.3371	160.7838
249.7	B	32.5311	-56.4979	221.6	Ni	341.3734	153.1065
230.4	Ba	227.3107	226.7227	213.6	P	464.375	47.4839
396.8	Ca	-534.824	506.7872	220.3	Pb	361.3903	-50.9932
226.5	Cd	275.5752	57.838	251.6	Si	14.9795	128.6809
267.7	Cr	-102.4702	-88.747	283.9	Sn	-199.6097	47.3144
324.7	Cu	-369.9202	101.6626	213.8	Zn	461.5029	-0.894
259.9	Fe	-49.8481	220.8933	334.9	Ti	-401.2032	23.8482
285.2	Mg	-202.6585	-192.7362	310.2	V	-317.9437	258.7749
257.6	Mn	-32.7989	85.962				

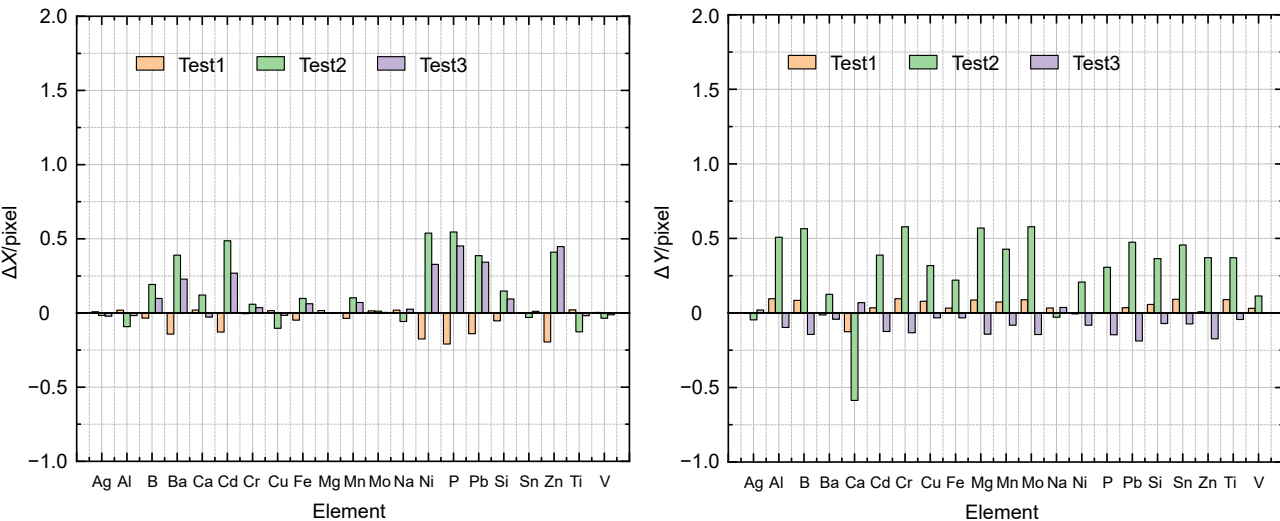


图 12 常见元素波长坐标残差补偿后最终偏差值

Fig. 12 Final deviation after residual compensation of wavelength coordinates of common elements

表 7 残差多项式拟合系数
Table 7 Residual polynomial fitting coefficients

Factor	Test1	Test2	Test3
A_1	3.373×10^{-2}	3.361×10^{-2}	9.772×10^{-4}
B_1	-8.157×10^{-5}	-1.153×10^{-4}	-2.517×10^{-6}
C_1	2.640×10^{-9}	6.465×10^{-9}	1.724×10^{-10}
A_2	-7.852×10^{-2}	1.142×10^{-1}	-1.312×10^{-2}
B_2	2.221×10^{-4}	-3.411×10^{-4}	3.365×10^{-5}
C_2	-9.151×10^{-9}	1.204×10^{-9}	-2.296×10^{-9}

且标定需求数据少等优点。且该算法对接收像面的滚转误差进行了详细的分析, 经仿真验证, 在像面有离焦与滚转的情况下, 使用汞氩灯特征波长光源进行仿真实验, 并且对比实际情况的二维谱图变化, 对不同情况下的待测元素二维光谱图进行谱图坐标修正。通过修正与补偿后的待测元素特征波长光斑坐标与理想坐标之间的差值小于 0.6 个像元尺寸, 为二维光谱图的谱图还原工作的准确性提供了保障。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

[1] Keliher P N, Wohlers C C. Echelle grating spectrometers in analytical spectrometry[J]. *Anal Chem*, 1976, **48**(3): 333A–340A.

[2] Ma K Q, Chen K X, Zhu N, et al. High-resolution compact on-chip spectrometer based on an echelle grating with densely packed waveguide array[J]. *IEEE Photonics J*, 2019, **11**(1): 4900107.

[3] García M, Aguirre M A, Canals A. A new multinebulizer for spectrochemical analysis: wear metal determination in used lubricating oils by on-line standard dilution analysis (SDA)

using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP OES)[J]. *J Anal At Spectrom*, 2020, **35**(2): 265–272.

[4] Cahyadi D, Susilowati E, Arsyansyah M, et al. Development of a rapid-test method for the determination of calcium, zinc, phosphorus, and sulfur in automotive engine oil by WD-XRF (wavelength dispersive x-ray fluorescent)[J]. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2020, **980**: 012050.

[5] Amais R S, Amaral C D B, Fialho L L, et al. Determination of P, S and Si in biodiesel, diesel and lubricating oil using ICP-MS/MS[J]. *Anal Methods*, 2014, **6**(13): 4516–4520.

[6] Li H L, Wang H B, Huang Y C, et al. Plasma characteristics and quantitative analysis of Pb and Ni in soil based on LIBS technology[J]. *Optoelectron Lett*, 2020, **16**(2): 143–148.

[7] Vinić M, Aruffo E, Andreoli F, et al. Quantification of heavy metals in oils with μL volume by laser induced breakdown spectroscopy and minimizing of the matrix effect[J]. *Spectrochim Acta Part B At Spectrosc*, 2020, **164**: 105765.

[8] Nevejans D, Neefs E, Van Ransbeeck E, et al. Compact high-resolution spaceborne echelle grating spectrometer with acousto-optical tunable filter based order sorting for the infrared domain from 2.2 to 4.3 μm [J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(21): 5191–5206.

[9] Cui T, Yin L, Liang P, et al. Development and prospects of spectral reduction technology of echelle spectrometer (Invited)[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2024, **61**(3): 0330003.

崔涛, 尹禄, 梁培, 等. 中阶梯光栅光谱仪谱图还原技术发展展望 (特邀)[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, **61**(3): 0330003.

[10] Liu K L, Hieftje G M. Investigation of wavelength calibration for an echelle cross-dispersion spectrometer[J]. *J Anal At Spectrom*, 2003, **18**(10): 1177–1184.

[11] Ning C L, Qi X D, Chen S J, et al. Optical design and performance analysis of light and small echelle spectrograph[J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2012, **32**(12): 3406–3410.

宁春丽, 齐向东, 陈少杰, 等. 轻小型中阶梯光栅光谱仪光学设计及性能分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(12): 3406–3410.

[12] Finkelstein N A. The measurement of wavelength in echelle spectra[J]. *J Opt Soc Am*, 1953, **43**(2): 90–96.

[13] McNeill J J. Wavelength measurement in echelle spectra[J]. *J*

- Opt Soc Am*, 1959, **49**(5): 441–444.
- [14] Zhu J W, Sun C, Yang J, et al. Spectrogram reduction for echelle grating spectrometer based on Polynomial fitting[J]. *Opt Precis Eng*, 2020, **28**(8): 1627–1633.
朱继伟, 孙慈, 杨晋, 等. 基于多项式拟合的中阶梯光栅光谱仪谱图还原[J]. *光学精密工程*, 2020, **28**(8): 1627–1633.
- [15] Tang Y G, Chen S J, Bayanheshig, et al. Spectral reducing of cross-dispersed echelle spectrograph and its wavelength calibration[J]. *Opt Precis Eng*, 2010, **18**(10): 2130–2136.
唐玉国, 陈少杰, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的谱图还原与波长标定[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(10): 2130–2136.
- [16] Fu X. Implementation of LIBS echelle spectrometer and research on data processing method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
<https://doi.org/10.27356/d.cnki.gtjdu.2018.000097>.
傅晓. LIBS 中阶梯光栅光谱仪实现技术及数据处理算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
<https://doi.org/10.27356/d.cnki.gtjdu.2018.000097>.
- [17] Cui T, Yin L, Sun Y N, et al. Spectral reduction algorithm for echelle spectrometer based on full-field fitting[J]. *Chin J Lasers*, 2024, **51**(8): 0811003.
崔涛, 尹禄, 孙亚楠, 等. 基于全像面拟合的中阶梯光栅光谱仪谱图还原算法[J]. *中国激光*, 2024, **51**(8): 0811003.
- [18] Zheng Q L, Wen L, Chen Q. Research progress of computational microspectrometer based on speckle inspection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(3): 200183.
郑麒麟, 文龙, 陈沁. 基于散斑检测的微型计算光谱仪研究进展[J]. *光电工程*, 2021, **48**(3): 200183.
- [19] Zheng Z H, Zhu S K, Chen Y, et al. Towards integrated mode-division demultiplexing spectrometer by deep learning[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, **1**(11): 220012.
- [20] Wang Y, Zeng Y A, Zheng H T, et al. Study on luminance accurate measurement method based on imaging spectrometer[J]. *Laser Technol*, 2024, **48**(2): 166–170.
王玉, 曾延安, 郑海霆, 等. 基于成像光谱仪的光亮度精确测量方法研究[J]. *激光技术*, 2024, **48**(2): 166–170.

作者简介



欧阳羽轩 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事中阶梯光谱仪方面的研究。

E-mail: oyyx@tju.edu.cn



【通信作者】傅晓 (1991-), 男, 博士, 天津大学副教授, 硕士研究生导师, 主要从事光电测量与光谱分析方向的研究。

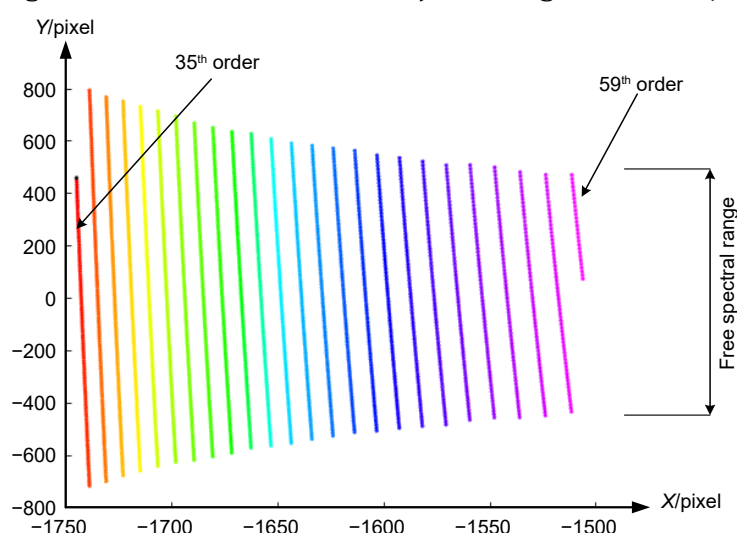
E-mail: fuxiao215@tju.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Spectral reduction algorithm for echelle grating spectrometer based on least-squares image coordinate correction

Ouyang Yuxuan¹, Fu Xiao^{1*}, Duan Fajie¹, Wang Kuan¹, Wu Jingxin²



Two-dimensional spectrogram of the echelle grating spectrometer in the free spectrum region

Overview: Echelle grating spectrometer uses a cross-dispersive optical structure for spectroscopy, forming a two-dimensional spectral image on the image plane. The reduction accuracy of the two-dimensional spectral image is to determine the accuracy of its wavelength measurement, but environmental changes, processing and mounting and other reasons will lead to the error between the actual spot coordinates and the theoretical spot coordinates, and the change of the spot coordinates will have a serious impact on the reduction accuracy of the spectral image. In this paper, a spectrum reduction algorithm for an echelle grating spectrometer based on least squares image coordinate correction is proposed. Firstly, the theoretical spot coordinates of the mercury lamp are recorded by simulation software, and then measurements are made using a calibrated mercury lamp light source, and the background noise reduction and morphological processing of the two-dimensional spectral map are carried out to obtain the center-of-mass coordinates of the actual spot of the wavelength of the mercury lamp, and then the coefficient matrix is constructed by utilizing the theoretical and actual image point coordinates, and then the coefficient matrix is solved from the obtained two-dimensional spectrum by the method of least squares. The coefficient matrix is solved by the least squares method to obtain the fitting coefficients of translation, scaling and rotation of the two-dimensional image plane, and then the polynomial fitting is used to reduce the influence of the residuals, realizing the image coordinate correction of the spot at different wavelengths, and then realize the accurate wavelength solution.

The experimental results show that the algorithm can effectively improve the spectral image reduction accuracy of the echelle grating spectrometer, and the center of mass extraction error is controlled at 0.6 image elements, and under the simulation of large mounting errors and environmental errors, the corrected coordinates of the measurements of the common elements deviate from their ideal coordinates by less than 0.6 image elements, which proves that the algorithm has high accuracy and provides a basis for the measurement of broad-band atomic emission spectra.

Ouyang Y X, Fu X, Duan F J, et al. Spectral reduction algorithm for echelle grating spectrometer based on least-squares image coordinate correction[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(7): 240134; DOI: 10.12086/oe.2024.240134

¹The State Key Lab of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ²China Aerospace Hunan Power Machinery Research Institute, Zhuzhou, Hunan 412002, China

* E-mail: fuxiao215@tju.edu.cn