

中阶梯光栅光谱仪信号光斑位置的质心提取算法

何 森^{1,2}, 唐玉国^{1*}, 陈少杰^{1,2}, 巴音贺希格¹, 崔继承^{1,2}

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 中阶梯光栅光谱仪二维谱图中, 信号光斑位置的提取精度直接影响光谱分析精度, 是中阶梯光栅光谱仪研制中的关键问题之一。为保证中阶梯光栅光谱仪的高分辨率特征(其分辨率一般为几千以上, 本仪器光谱分辨率为 15 000), 信号光斑的位置提取误差应小于 0.03 mm(小于 2 个像素)。在分析中阶梯光栅光谱仪谱图特征的基础上, 提出了一种基于质心法的信号光斑位置提取算法, 即通过搜索信号光斑探测窗口进行光斑判读以及信号光斑质心计算, 实现了信号光斑位置的精确读取。实验结果表明, 采用该算法可以有效地去除噪声光斑的干扰, 实现信号光斑位置的快速精确读取, 位置提取误差小于 2 个像素, 波长误差小于 0.02 nm, 满足本仪器要求。

关键词 中阶梯光栅光谱仪; 二维光谱; 质心计算; 交叉色散

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)03-0849-05

引 言

中阶梯光栅光谱仪是高分辨率、宽波段范围、全谱直读的新型高端光谱分析仪器, 它以高色散、全波闪耀的中阶梯光栅为核心分光器件, 以普通光栅或棱镜作为横向色散元件, 经交叉色散后在像面形成二维重叠光谱, 采用面阵探测器进行接收。与传统光谱分析仪器相比, 中阶梯光栅光谱仪具有体积小、分辨率高、全谱瞬态直读的优点, 是光谱分析仪器的发展趋势之一^[1, 2], 在原子光谱分析、等离子体光谱分析、微量物质探测、大气监测、宇宙探索等领域都有广阔的应用前景^[3-7]。

由于中阶梯光栅光谱仪通过交叉色散形成二维重叠光谱图像, 实现光谱分析的基础是二维谱图还原技术, 即由二维重叠光谱图像提取一维光谱信息的过程。文献[8]通过建立谱图数据模型, 将图像中的像素位置与波长相对应, 实现了二维图像到一维光谱信息的转换, 旨在实现全谱快速判读与分析。但是, 全谱快速判读与分析的准确度取决于信号光斑位置坐标的读取精度, 其读取误差直接影响波长标定精度以及仪器的分辨率。因此, 信号光斑位置坐标的精确读取是中阶梯光栅光谱仪进行光谱分析的关键技术之一。在中阶梯光栅光谱仪光学系统中, 由于像差的影响, 二维谱图中各信号

光斑弥散情况不同, 而且仪器构件带来的杂光以及探测器的随机噪声都会形成噪声光斑, 对信号光斑的准确判别和读取造成影响。为保证光谱分析的精度, 必须建立有效算法, 对二维谱图中的信号光斑和噪声光斑进行甄别, 并确定信号光斑位置坐标。目前, 国内对中阶梯光栅光谱仪的研制和信号处理尚处于起步阶段^[9], 国外的文献也较少介绍具体算法方面的内容。鉴于此, 从自主开发中阶梯光栅光谱仪的实际需求出发, 根据中阶梯光栅光谱仪的谱图特征, 提出了一种基于质心法的信号光斑提取算法, 以快速判别信号光斑, 并通过计算光斑质心实现光斑位置的精确读取。通常以计算光斑质心表征光斑位置多见于 CCD 光斑位置提取, 计算精度高、稳定性好、处理速度快, 作为基础算法成功应用于空间光通信 APT 技术、高精度星敏感器、Hartman 波前传感器等技术^[10-12], 但是, 尚未见到用于光谱分析的实例。通过本工作表明, 将用于图像处理的方法与中阶梯光栅光谱仪的二维谱图特征相结合, 能够快速判别信号光斑并精确计算其位置, 并可以有效去除噪声光斑的干扰, 位置提取误差较小, 满足中阶梯光栅光谱仪二维谱图还原技术要求。

1 中阶梯光栅光谱仪原理

1.1 光谱仪结构及谱图特征

收稿日期: 2011-06-14, 修订日期: 2011-10-30

基金项目: 国家创新方法工作专项项目(2008IM040700), 吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG005)和吉林省科技支撑计划项目(20106011)资助

作者简介: 何 森, 女, 1986 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生 e-mail: hemmmm95@sina.com

* 通讯联系人 e-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

光谱仪采用 C-T 结构,以中阶梯光栅作为主色散元件,色散方向为像面 Y 轴方向,以反射棱镜作为交叉色散元件,色散方向与中阶梯光栅垂直,通过离轴抛物镜进行准直与聚焦,使交叉色散系统具有平场成像特性。入射光经准直后入射到中阶梯光栅,衍射光束再经反射棱镜横向色散,最终聚焦在面阵 CCD 靶面处,得到二维重叠光谱图像^[8, 13]。

理想情况下,当照明光源为连续光谱时,光谱分布如图 1 所示,其中各阶梯线表征了相应光谱级次自由光谱区内波长的分布位置与范围。当照明光源为非连续光谱时,光谱分布如图 1 中各离散点所示,其中各离散点的位置表征相应光斑的光谱级次与波长信息。

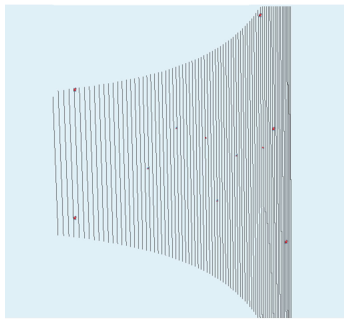


Fig. 1 The image of two-dimension spectra

1.2 二维重叠谱图还原

由于中阶梯光栅光谱仪二维重叠光谱图像比较复杂,如何将其还原为一维光谱信息是中阶梯光栅光谱仪研制的关键技术之一。

通过分析系统的交叉色散特性,可以建立出中阶梯光栅光谱仪的谱图数据模型 $M_{k,XY}$ ^[8]。该模型是一个行列数与探测器纵横像素数相同的矩阵,即式(6),矩阵的每一元素的行列号分别为探测器的纵横像素序数,矩阵元的值为由该行列号确定的像素处的光斑波长。通过谱图数据模型,建立起探测器靶面的各像素点与波长的精确关系,由此可以得到像面任意位置对应的波长值,也可以得到任意波长像点对应的位置坐标。

$$M_{k,XY} = \begin{bmatrix} \lambda_{X_1 Y_1} & \lambda_{X_1 Y_2} & \cdots & \lambda_{X_1 Y_l} \\ \lambda_{X_2 Y_1} & \lambda_{X_2 Y_2} & \cdots & \lambda_{X_2 Y_l} \\ \lambda_{X_w Y_1} & \lambda_{X_w Y_2} & \cdots & \lambda_{X_w Y_l} \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过以上分析可以得到光谱范围内的连续无重叠谱图,如图 2 所示。光谱图像中 Y 方向为光栅色散分布的方向,而 X 方向为中阶梯光栅各衍射级次分布的方向。

1.3 信号光斑提取

信号光斑位置的精确读取是谱图还原与波长标定的前提。通过分析中阶梯光栅光谱仪的谱图模型可知,当信号光斑位置的读取在 Y 向出现误差时,经谱图还原算法处理得到的光栅色散量出现偏差,导致仪器的分辨率降低;当信号光斑位置的读取在 X 向出现误差时,可能出现级次判别误差,导致波长标定错误。因此,在二维谱图还原过程中必须保证信号光斑判别的准确性与位置读取的精度。

理想状态下,光谱仪的 C-T 结构使得像点为等大的入射

针孔像。由于光学系统存在的各种象差,探测器接收的二维光谱图像是一系列形状不同的弥散斑,而仪器构件带来的杂光以及探测器的随机噪声都会形成噪声光斑,混杂在二维谱图的信号光斑中,对光谱分析的准确性造成影响。探测器实际拍摄的二维光谱图像如图 3 所示,如何在其中对信号光斑进行准确判别并精确读取位置坐标,是中阶梯光栅光谱仪谱图分析的重要内容,直接影响光谱分析结果的正确性与准确性。

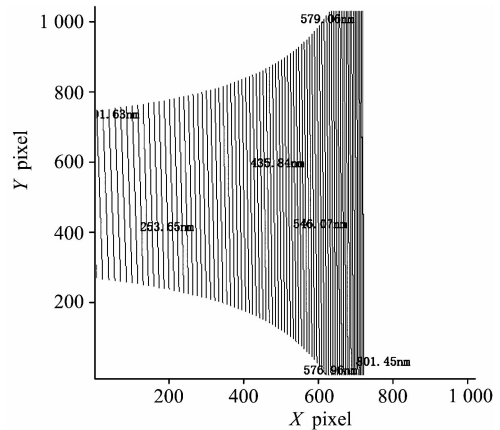


Fig. 2 The model of the echelle spectra



Fig. 3 The detected image

2 中阶梯光栅光谱仪信号光斑位置的质心提取算法

2.1 信号光斑特征分析

为准确提取中阶梯光栅光谱仪谱图中信号光斑的位置,必须对信号光斑的特征进行分析。本光谱仪系统采用 C-T 结构形式,使得由针孔入射的光线在像面处成像倍率为 1,因此,理想状态下各波长的像点均为等大的入射针孔像。仪器的入射针孔直径为 $15 \mu\text{m}$,像元尺寸为 $13 \mu\text{m}$,理想的像点为 2×2 像素范围内、强度由中心向四周递减的圆斑,能量集中于光斑中心处。由于光学系统存在各种像差,实际像面上得到的信号光斑弥散形状随波长而异,弥散范围也不同。

如表 1 中所列,在仪器光谱范围内选择七个衍射级次的上限、下限与中心波长,采用 Code V 软件对其成像情况进行模拟分析,各像点的模拟结果如图 4 所示。分析连续无重叠的谱图数据模型可知,各衍射级次的上限、下限与中心波

长的像点分别位于该次级的 Y 向两端及中心位置, 各衍射级次分布于 X 方向不同位置, 因此, 选取的像点可以表征像面不同位置的光斑情况。

Table 1 The selected wavelengths

列号	衍射级次	上光斑波长	中光斑波长	下光斑波长
1	52	500.000 0	504.807 7	509.708 7
2	58	448.717 9	452.586 2	456.521 7
3	65	400.763 4	403.846 2	407.076 0
4	75	347.682 1	350.000 0	352.349 0
5	87	300.000 0	301.724 1	303.468 2
6	105	248.815 2	250.000 0	251.196 1
7	131	199.619 8	200.381 7	201.149 4

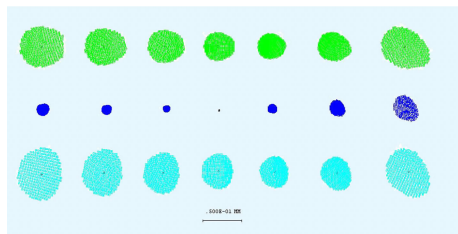


Fig. 4 Spots simulation for the selected wavelengths

由图 4 的模拟成像结果可知, 位于像面中心位置的光斑弥散最小, 越远离像面中心位置, 光斑弥散范围越大。理想的像点为与入射射孔等大的圆斑, 光强由中心向四周递减, 其光斑质心与几何中心重合, 可用来表征光斑所在位置。由于实际的各信号光斑形状各异、弥散范围不同, 几何中心位置分布无规律可循; 但各光斑光强都相对集中, 由质心所在的小区域向四周弥散, 符合理想像点的特征, 因此, 可以采用光斑质心来表征各信号光斑的位置。结合中阶梯光栅光谱仪信号光斑的形状与分布特征, 本工作提出一种基于质心法的信号光斑位置读取算法, 快速判别信号光斑, 精确提取其质心位置坐标。

2.2 中阶梯光栅光谱仪信号光斑位置的质心提取算法

基于质心法的中阶梯光栅光谱仪信号光斑位置提取算法, 首先对光谱图像进行处理, 根据信号光斑的弥散形状与光强分布特点设置窗口判别条件, 在谱图模型中非零元素的像素坐标处逐一选取包含单个光斑的小区域进行判别, 排除噪声光斑的干扰, 得到各信号光斑的探测窗口, 并在窗口中计算相应光斑的质心位置坐标, 实现光斑位置的精确读取。

为精确计算光斑质心位置, 探测窗口中应包含信号光斑的全部有效光强信息, 并且每个探测窗口内只能包含单个目标光斑。由于不同探测对象的光斑分布和形状具有不同特点, 需要根据具体应用对象采取相应的窗口选取方法^[14-18], 即结合其光斑特点设定窗口判别条件, 以保证有效去除噪声光斑干扰、准确判别信号光斑, 同时可以避免逐个像素点判断, 减少运算量、提高运算速度。根据信号光斑模拟结果, 取最大弥散光斑面积 7×7 像素作为光斑模板, 设定光斑探测窗口的判定条件。由于各像点为强度由质心所在区域向四周递减的弥散斑, 因此, 每一探测窗口内应包含光强值大于

周围像素的光强极大像素, 且此像素不是均匀背景下的随机噪点。根据这一特点, 设定光斑探测窗口的判别条件为:

(1)模板中心像素的光强值不小于周围像素, 即

$$I(i, j) \geq I(i + p, j + q) \quad (7)$$

其中, $p, q = -1, 0, 1$ 且 p, q 不同时为零。

(2)模板中心 3×3 像素区域的光强累计值大于周围相同范围内的光强累计值, 即

$$\sum_{t,s=-1,0,1} I(i+t, j+s) > \sum_{t,s=-1,0,1} I(i+p+t, j+q+s) \quad (8)$$

其中, $p, q = -1, 0, 1$ 且 p, q 不同时为零。

同时满足式(7)和式(8)的模板判定为一个信号光斑的探测窗口, 此模板的中心像素 (i, j) 即光斑的光强极大值所在像素, 如图 5 所示。图 5 中, (a)(b)(c)均为信号光斑的探测窗口, 中心像素的光强为窗口内的极大值, 窗口中包含了该光斑的全部有效信号, 而光斑的质心如图中标记。

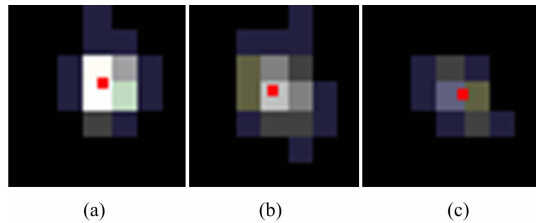


Fig. 5 Examples of spot detection window

由于光谱范围内所有波长的像点均分布在谱图模型中非零元素对应的像素位置处, 只需将模板置于对应谱图模型中非零元素的像素处判别即可。为简化步骤、提高运算速度, 首先将实际接收的光谱图像与此状态下的标准谱图数据模型比对, 出现在模型中非零元素对应位置的光斑为信号光斑。考虑到探测器的离散采样特性, 将模板中心置于这些位置及其周围 8 像素范围内进行判别, 寻找包含信号光斑的探测窗口。而噪声光斑不符合信号光斑的形状特征以及在谱图模型中的分布规律, 因此, 在探测窗口的选取过程中被滤除。

判别得到的每一光斑探测窗口, 其中心像素点为光斑的强度极大值所在像素, 取此光强值的一半设为阈值, 光强值大于阈值的像素为计算质心的有效区域, 提取其光强值与像素坐标, 从而计算出信号光斑的质心位置。

在探测窗口中, 光斑的质心位置计算如下

第 j 个光斑质心定义为

$$X_j = \frac{\int_{A_j} xI(x, y) dx dy}{\int_{A_j} I(x, y) dx dy}, Y_j = \frac{\int_{A_j} yI(x, y) dx dy}{\int_{A_j} I(x, y) dx dy} \quad (9)$$

其中, A_j 是第 j 个光斑的探测窗口面积; $I(x, y)$ 是第 j 个光斑在探测窗口内光强分布。考虑到探测器的离散采样特性, X_j 和 Y_j 可通过对小面积内的像素求和取代方程中的积分求得

$$X_j = \frac{\sum_{(X,Y) \in A_j} X \cdot I(X, Y)}{\sum_{(X,Y) \in A_j} I(X, Y)}, Y_j = \frac{\sum_{(X,Y) \in A_j} Y \cdot I(X, Y)}{\sum_{(X,Y) \in A_j} I(X, Y)} \quad (10)$$

其中, X 和 Y 分别为光斑探测窗口 A_j 内探测器各像素的坐标; $I(X, Y)$ 为第 (X, Y) 个像素接收的信号强度。

在判别得到的每一探测窗口中, 应用式(10)计算其中的目标光斑质心, 获得各信号光斑的准确位置。光斑质心的计算流程如图 6 所示。

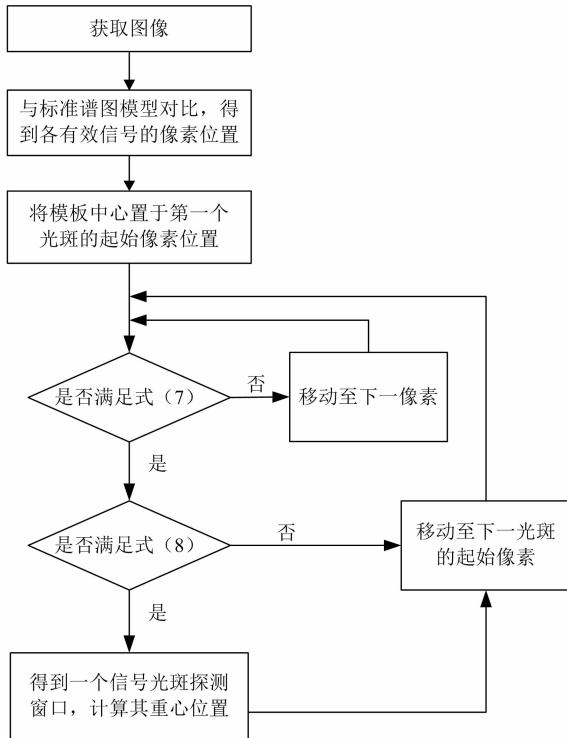


Fig. 6 The flow chart of centroid calculating

3 实验结果

采用中阶梯光栅光谱仪信号光斑位置的质心提取算法, 对自主研发的中阶梯光栅光谱仪光谱图像进行了信号光斑提取实验。中阶梯光栅光谱仪参数如表 2 所示。

Table 2 Parameters of the echelle spectrograph

	设计参数
光谱范围/nm	200~800
分辨率	15 000
针孔直径/ μm	15
像元尺寸/ μm	13
像元数	1 024×1 024

实验采用标准汞灯作光源, 其光谱为集中于紫外和可见波段的分立谱线, 其中, 253.65, 365.02, 404.66, 435.84, 546.07, 576.96 和 579.07 nm 分布在探测像面的较大范围内, 能够表征本仪器整个谱段内的光斑特征。实验前, 对中阶梯光栅光谱仪系统进行精确装调^[19], 保证谱图还原中的数据模型与此状态下拍摄的光谱图像一致。应用中阶梯光栅光谱仪信号光斑位置的质心提取算法对拍摄的光斑图像进行处理, 计算出信号光斑的质心位置, 并根据建立的谱图模型

得出其波长值。当标定的波长值与已知标准值相符, 即计算出的光斑质心位置与模型中的光斑位置一致时, 可以认为光斑位置提取准确。

应用信号光斑提取算法得到的信号光斑图像如图 7 所示, 与图 3 对比, 经光斑位置提取算法处理后, 原始光谱图像中的过饱和像素点和噪声光斑被去除, 处理后的光斑图只包含各信号光斑的探测窗口中光强大于阈值的有效像素, 图像对比度增强, 光斑的弥散情况得到改善, 光强最为集中的区域被提取出来, 以实现质心位置坐标的精确计算。



Fig. 7 The image after processing

表 3 所示为汞灯主要特征波长的光斑位置实验提取结果, 其中 546.07 与 579.07 nm 的光斑处出现过饱和像素点, 不计入分析结果。各波长光斑质心位置与标准谱图模型中位置偏差在 2 个像素以下, 标定波长的误差小于 0.02 nm。谱图还原后的一维光谱如图 8 所示。

Table 3 The experimental results

标准波长 /nm	谱图位置 /像素	质心位置 /像素	标定波长 /nm	标定波长误差 /nm
253.65	(108, 636)	(108, 637)	253.668	0.018
365.02	(468, 442)	(468, 442)	365.024	0.004
404.66	(527, 484)	(527, 484)	404.663	0.003
435.84	(559, 185)	(559, 186)	435.846	0.006
576.96	(653, 954)	(652, 953)	576.946	0.014

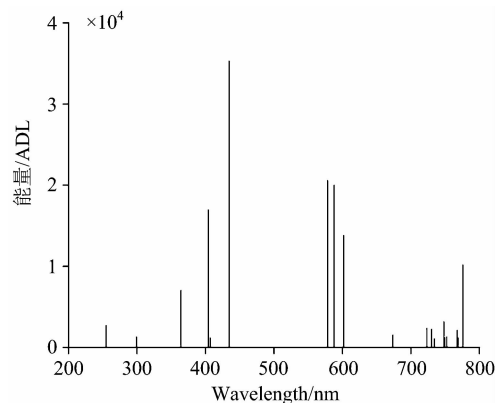


Fig. 8 The spectra after spectral reducing

4 结 论

中阶梯光栅光谱仪的信号光斑位置的精确读取对光谱分析结果的正确性以及精度具有重要影响。通过分析中阶梯光栅光谱仪的谱图特征,提出了一种基于质心法的信号光斑位

置提取算法,根据光强分布特征计算出光斑的精确位置。经实验验证,采用该算法对中阶梯光栅光谱仪的光谱图像进行处理,能够快速识别各信号光斑,并对其质心位置坐标进行精确计算,提取误差小于0.03 mm,(小于2个像素),波长误差小于0.02 nm,完全满足本系统中二维阶梯谱图还原与波长标定的要求。

References

- [1] Udupa D V, Kumar Sanjiva, Shetty B J, et al. BARC Newsletter, 2008, 295: 9.
- [2] HU Zhong-wen(胡中文). Study of Generalized Grating Equation, Measurement of Grating Spacings and CCD Echelle Spectrograph(广义光栅方程与光栅密度测试及二维 CCD 全谱仪的研制). Hefei: University of Science and Technology of China(合肥:中国科学技术大学国家同步实验室), 2005.
- [3] Becker-Ross H, Okruss M, Florek S, et al. Spectrochimica Acta Part B, 2002, 57: 1493.
- [4] Florek S, Haisch C, Okruss M, et al. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2001, 56: 1027.
- [5] Dennis Nevejans, Eddy Neefs, Emiel Van Ransbeeck, et al. Applied Optics, 2006, 45(21): 5191.
- [6] Makoto Suzuki, Yasuhiro Sasano. SPIE, 2553: 48.
- [7] Akihiko Kuze, Makoto Suzuki, Kunio Nakamura, et al. SPIE, 3437: 240.
- [8] TANG Yu-guo, CHEN Shao-jie, Bayanheshig, et al(唐玉国,陈少杰,巴音贺希格,等). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2010, 18(10): 2130.
- [9] XIE Pin, NI Zheng-ji, HUANG Yuan-shen, et al(谢品,倪争技,黄元申,等). Laser Journal(激光杂志), 2009, 30(2): 4.
- [10] LI Xiao-feng, LUO Tong, DENG Ke, et al(李晓峰,罗彤,邓科,等). Optical Communication Technology(光通信技术), 2004, (6): 13.
- [11] LI Chun-yan, XIE Hua, LI Huai-feng, et al(李春艳,谢华,李怀锋,等). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2006, 33(2): 41.
- [12] SHEN Feng, JIANG Wen-han(沈锋,姜文汉). Acta Optica Sinica(光学学报), 2000, 20(5): 666.
- [13] TANG Yu-guo, SONG Nan, Bayanheshig, et al(唐玉国,宋楠,巴音贺希格,等). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2010, 18(9): 1989.
- [14] Prieto P M, et al. J. Opt. Soc. Am. A, 2000, 17(8): 1388.
- [15] Sandrine Thomas. Proceedings of SPIE, SPIE, Bellingham, WA, 2004. 5490.
- [16] QUAN Wei, WANG Zhao-qi, ZHANG Chun-shu, et al(全薇,王肇圻,张春书,等). Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2002, 13(11): 1148.
- [17] WANG Wei, CHEN Huai-xin(王薇,陈怀新). High Power Laser and Particle Beams(强激光与粒子束), 2006, 18(8): 1249.
- [18] WANG Peng, ZHOU Xin, WANG Yong, et al(王鹏,周昕,王勇,等). Laser Journal(激光杂志), 2005, 26(5): 46.
- [19] LI Na-na, AN Zhi-yong, CUI Ji-cheng(李娜娜,安志勇,崔继承). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2009, 17(3): 531.

Position Acquiring of Signal Spots in the Echelle Spectrograph

HE Miao^{1,2}, TANG Yu-guo^{1*}, CHEN Shao-jie^{1,2}, Bayanheshig¹, CUI Ji-cheng^{1,2}

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract It is important for the echelle spectrograph to acquire the exact positions of the spots in the two-dimension spectra image, which directly influence the precision of spectral analysis. With the target of high resolution, which is 15 000 in the echelle spectrograph being discussed, the acquired positional error must be less than 0.03 mm-which equals 2 pixels. According to the characters of the two-dimensional spectra, a position-acquiring method for the signal spots based on the centroid computing algorithm was put forward. Applying this method, the signal spots were distinguished from the noise spots and their positions can be acquired accurately and swiftly, with the positional error less than 2 pixels and wavelength error 0.02 nm, which satisfy the requirements of the echelle spectrograph.

Keywords Echelle spectrograph; Two-dimensional spectra; Centroid calculating; Cross dispersion

* Corresponding author

(Received Jun. 14, 2011; accepted Oct. 30, 2011)