第36卷，第6期
2016年6月

光谱学与光谱分析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 36, No. 6, pp1925-1929
June, 2016

中阶梯光栅光谱仪谱图背景去除算法

尹　禄[1,2]，巴音贺希格[1*]，姚雪峰[1]，崔继承[1]，朱继伟[1]，张　锐[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. 中国科学院大学，北京　100049

摘　要　中阶梯光栅光谱仪凭借交叉色散特性实现全谱瞬态直读，面阵探测器接收的二维光谱图像需要还原成一维谱图以提取有效波长。由于二维谱图含有庞大的数据，且有效信息仅占极小比例，因此在谱图还原前进行背景去除能够减小数据量、提高运算速度。详细分析了中阶梯光栅光谱仪二维图像的特点，并针对其特点提出了背景去除算法。将图像边缘检测方法应用于弥散光斑的检测中，选择合适的边缘检测算子与原始图像卷积得到边缘图像，设置边缘图像的全局阈值对其进行二值分割，最终利用二值边缘图像映射原始图像得到去除背景的二维谱图。依据不同元素灯在不同积分时间下所拍摄的谱图，对比不同边缘检测算法的背景去除效果，分析了各算子对算法速度、精度的影响。实验结果表明本文提出的算法运算简单、边缘图像阈值易于计算、目标提取精度高，处理后的图像可以与谱图还原算法有效对接，谱图处理速度显著提升。

关键词　中阶梯光栅光谱仪；图像处理；背景去除；边缘检测；图像分割
中图分类号：TH744　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2016)06-1925-05

引　言

中阶梯光栅光谱仪凭借着其在分辨率、光谱获取速度、能量传输效率、体积等方面的优势成为光谱分析仪器领域研究的热点与重点[1-2]。受中阶梯光栅制作工艺和大面积面阵探测器技术的限制，中阶梯光栅光谱仪的研究正式起步于20世纪90年代，自2004年德国第一台商品化中阶梯光栅光谱仪问世以来，国外相继研究出了很多产品[3-4]。随着国外中阶梯光栅光谱仪的应用从天文转向民用，我国近期也开展了相关研究并于2008年研制出第一台原理样机[5]，但关于其谱图处理方面的研究进展缓慢，鲜有文献报道。

中阶梯光栅光谱仪二维谱图包含庞大的数据信息且有效数据所占比例极低，为了提升图像处理效率，需要在谱图还原前对二维谱图进行图像分割，选择普适的背景去除算法，保留有效光斑、去除背景噪声。由于中阶梯光栅光谱仪所拍摄图像随着待测物质、积分时间、实验环境的不同而变化，给背景去除算法的设计提出了难题。

数字图像的边缘指灰度值发生剧烈变化的像素的集合。边缘检测是数字图像处理的关键内容，通过相关算法检测目标和背景的边缘从而提取目标信息、去除背景。虽然中阶梯光栅光谱仪的图像复杂多变，但有效光斑强度始终大于其周围的背景强度，可以通过检测边缘即检测灰度值突变较大的位置从而达到提取有效光斑的目的。边缘检测一般应用于不便利用全局阈值分割的图像，通过设计边缘检测器作用于原始图像，得到易于阈值分割的边缘图像，最后将分割后的边缘图像映射原始图像得到背景去除后的目标图像。目前，国内外对边缘检测算法的研究已相当成熟，并以检测目标与背景突变边缘、设置全局阈值分割边缘图像为算法内核衍生出了很多应用针对性强的算法[6-8]。

鉴于此，本文在分析中阶梯光栅光谱仪二维谱图的基础上提出了一种适合其谱图特性的边缘检测器及边缘图像阈值设置方法，能够在谱图还原之前对二维谱图进行预处理，分割有效光斑和谱图背景。处理后的谱图只存留有效波长对应的光斑信息，减小了后续谱图还原的数据量，显著提升了图像处理的速度。

1　中阶梯光栅光谱仪谱图的特殊性

中阶梯光栅光谱仪二维谱图包含了全部光谱信息，需要

收稿日期：2015-04-20，**修订日期**：2015-08-11
基金项目：国家重大科学仪器设备开发专项项目(2014YQ120351)，国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2008-1)和吉林省科技发展计划项目(20140203011GX)资助
作者简介：尹　禄，1989年生，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生　　e-mail：yinlu890622@163.com
*通讯联系人　　e-mail：bayin888@sina.com

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据谱图还原模型构建光斑质心坐标与波长的对应关系，先将二维谱图还原为横、纵坐标分别为波长和光强的一维谱图，再提取有效波长[9]。中阶梯光栅光谱仪二维谱图如图 1 所示，与普通光谱仪器的谱图不同，其以下特殊性增加了图像分割的难度。

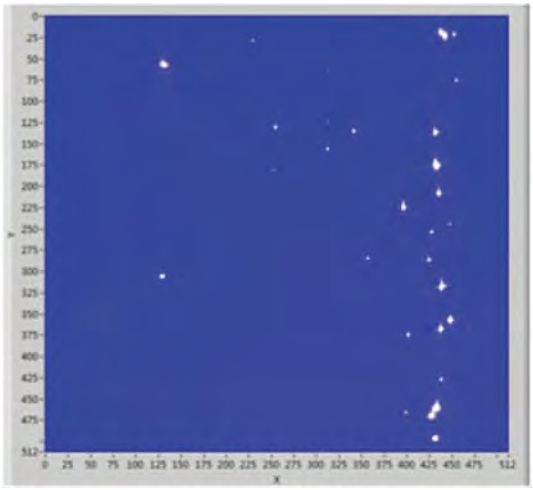

图 1 中阶梯光栅光谱仪二维谱图

Fig. 1 Spectra Image of echelle spectrometer

1)有效光斑覆盖像素数少

待测光源一般包含几种或十几种元素，其特征谱线总带宽远小于仪器波段范围，尽管像差令光斑弥散扩大，但有效光斑覆盖像素数所占探测器像素总数的比例仍不足 0.1%。这使得一般基于阈值的图像分割算法(直方图处理、全局阈值处理)无法计算准确的阈值，易于造成有效光斑遗漏或背景去除不彻底。

2)图像背景不确定性大

探测器的随机噪声和暗电流噪声增加了中阶梯光栅光谱仪二维谱图背景灰度值的不确定性，相同实验条件拍摄的图像仍存在差异。对拍摄的二维谱图直接提取光斑质心，总会有很多灰度值恰好满足质心提取算法的背景像素被提取出来，对提取结果造成很大干扰，增大了图像分割的难度。

3)有效光斑灰度幅值跨度大

谱图中有效光斑灰度与待测物质浓度、CCD 积分时间成正比，灰度幅值跨度很大。不同的待测物质和实验操作条件也会使谱图结果千差万别，难以选择合适的分割阈值。而且同一图像中可能会出现较亮部分背景的灰度值与较暗部分有效光斑的灰度值相当的情况，因此无法设置一个普适的全局阈值对图像进行背景去除。

2 背景去除算法

由于有效光斑覆盖像素数少、图像背景不确定性大、有效光斑灰度幅值跨度大，一般图像分割方法无法有效分割中阶梯光栅光谱仪谱图，但其有效波长对应光斑灰度值总是大于附近背景的灰度值。据此，可以设计合适的边缘检测器寻找二维谱图中灰度突变像素的坐标，进而确定有效光斑位置。再设置全局阈值分割边缘图像，最终通过边缘图像映射原始图像达到分离有效光斑、去除背景噪声的目的，算法流程图如图 2 所示。

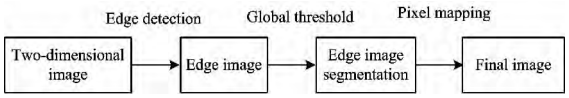

图 2 算法流程图

Fig. 2 The flowchart of algorithm

2.1 边缘检测

边缘检测[10-11]通过判别灰度值的变化程度来达到寻找边缘的目的。数字图像的边缘检测可以视作空间滤波器算子与图像的卷积作用，滤波器在某区域中心点的响应可以写作

$$R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \cdots + w_i z_i = \sum_{k=1}^{i} w_k z_k \qquad (1)$$

其中 w_k 是像素灰度值，空间滤波器算子如图 3 所示。

Z_1	Z_2	Z_3
Z_4	Z_5	Z_6
Z_7	Z_8	Z_9

图 3 空间滤波器算子模板

Fig. 3 Template of spatial filter operator

边缘检测可以归结为边缘检测器即空间滤波器算子的设计，目前常用的空间滤波器算子有用于孤立点检测的拉普拉斯算子与 LOG 算子、用于线检测的 Sobel 算子与 Prewitt 算子、Robert 算子等，如图 4 所示。

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

(a) Laplace

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

(b) Prewitt

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

(c) Sobel

-1	0
0	1

0	-1
1	0

(d) Robert

0	0	-1	0	0
0	-1	-2	-1	0
-1	-2	16	-2	-1
0	-1	-2	-1	0
0	0	-1	0	0

(e) LOG

图 4 常用的空间滤波器算子

Fig. 4 Common spatial filter operator

中阶梯光栅光谱仪的入射端为针孔，针孔直径略小于探测器单像元尺寸，理想成像时应当占满一个像元。但是仪器装调误差不可避免，且在自由光谱区内越偏离中心波长像差越大，因此一般光斑是占 3×3 像素(中心波长)甚至更大的椭圆弥散斑(边缘波长)。如图 5 所示，这些椭圆弥散斑可以看成高斯光斑附加像差后的结果，它们的强度仍符合中心强度最大、向四周强度逐渐递减的规律，离光斑中心等距的像

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

素其接收光强值近似与其被光斑覆盖的面积成正比。根据椭圆弥散斑的成像规律，灰度最大的像素(中心像素)垂直、水平相邻像素灰度值衰减比 45°相邻像素灰度值衰减慢，即符合

$$f(x,y) > f(x\pm 1,y),\ f(x,y\pm 1) > f(x\pm 1,y\pm 1) \tag{2}$$

其中 f 为原始图像中某目标光斑所覆盖像素的灰度值，(x,y)为灰度值最大的坐标。

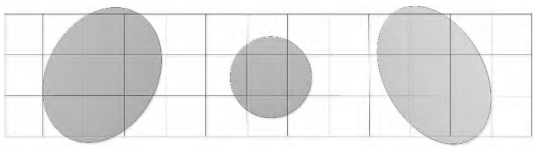

图 5　中阶梯光栅光谱仪成像光斑示意图

Fig. 5　The spot of echelle spectrometer

据此应选择对中心像素的垂直、水平像素响应强的算子。为了节约检测时间和运算资源，在不影响检测精度的前提下应尽可能选择卷积运算简单的算子。

2.2　边缘图像阈值分割

确定边缘检测算子后，将算子与原始图像卷积得到边缘图像。不同于原始图像，边缘图像的背景像素灰度变化更加平缓、与目标像素的灰度值差别更加明显，易于通过设置全局阈值对边缘图像进行分割，且边缘图像与原始图像像素之间具有位置上的一一对应关系。

依据中阶梯光栅光谱仪的设计和实验经验，虽然二维谱图的背景灰度值会随拍摄条件的变化而改变而且像面的不同区域背景灰度值会有较大差别，但是相邻的背景像素(3×3 区域内的各像素之间)灰度值差别不会超过一个易于提取的值(与探测器响应有关，与待测物质和积分时间无关)。据此，可以求解出不同边缘检测算子作用于背景区域后得到的极限响应值，以拉普拉斯算子为例，

$$R_{\max} = (8w_5 - w_1 - \cdots - w_9)_{\max} = 8(w+\Delta w) - (w-\Delta w) - \cdots - (w-\Delta w) = 16\Delta w \tag{3}$$

式中取正响应为最大值，负响应均为最小值，可以得到最大的响应结果 $R_{\max}$。如果 $R_{\max}$仍远小于目标边缘响应值，那么则以 $R_{\max}=16\Delta w$ 作为边缘图像的全局阈值 T 将其二值化

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & F(x,y) > T \\ 0 & F(x,y) < T \end{cases} \tag{4}$$

其中 $F(x,y)$为边缘图像，$g(x,y)$为二值化后的边缘图像。

据此，应选择的边缘检测算子元素绝对值之和应尽可能小，以避免背景卷积最大值与边缘卷积最小值难以区分的情况。

2.3　二值边缘图像映射原谱图

边缘图像根据原始图像与边缘检测算子卷积得来，边缘图像矩阵中每一个元素的值均反映它在原始图像中相应像素与周围像素灰度值变化的剧烈程度。图像分割后的二值边缘图像中，元素为 1 的位置对应原始图像目标光斑的边缘像素，元素为 0 的位置对应原始图像中背景像素以及目标光斑中心由于过饱和等原因而灰度值变化不大的像素。对光斑中心像素为零的图像再次空间滤波，利用形态学膨胀算法可以将光斑中心的 0 元素置 1。

最后利用原始图像和二值边缘图像的对应关系得到背景去除后的二维谱图，该谱图仅包含目标光斑及其边缘的灰度信息，大量的背景像素灰度信息被置零，为后续的谱图还原工作节约了运算成本。

据此，为了提升背景去除算法的速度，应选择的边缘检测算子能够对中心像素灰度值变化不大的光斑正确响应，以省去对边缘图像二次处理的步骤。

2.4　背景去除算法

前三节分析了背景去除算法的三个主要步骤，并结合中阶梯光栅光谱仪的谱图特点提出了使算法最优化的边缘检测算子选择要求。综合考虑背景去除算法的精度、速度，选择了如图 6 所示的边缘检测算子，该算子在拉普拉斯算子的基础上进行了简化，优先考虑中心垂直、水平像素的响应，并使检测算子元素的绝对值之和尽可能小。取得到的边缘图像全局阈值 $T=8\Delta w$ 进行二值分割，最终映射原始图像得到最后结果。

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

图 6　改进的边缘检测算子

Fig. 6　Improved edge detection operator

3　结果与讨论

利用课题组自主研发的中阶梯光栅光谱仪拍摄 Bi，Fe，Zn 和 Hg 不同积分时间下的谱图，并应用不同边缘检测算子编写背景去除算法，对比运算时间和波长提取精度。图 7 以锌元素谱图为例展示了经过不同算子去除背景后的谱图。

多次测试算法的运行时间并计算统计平均值，各算法处理不同待测元素不同积分时间的运行时间如表 1 所示。

表 1　不同算法的运行时间(s)

Table 1　Running time of different algorithm(seconds)

	Original	Improved operator	Laplace	LOG	Prewitt	Sobel
Bi(5 s)	2.899	0.171	0.169	0.185	0.371	0.346
Bi(10 s)	3.293	0.184	0.187	0.196	0.393	0.381
Fe(5 s)	2.922	0.176	0.175	0.191	0.397	0.387
Fe(10 s)	3.148	0.182	0.183	0.205	0.421	0.417
Zn(1 s)	3.134	0.159	0.175	0.189	0.387	0.349
Zn(5 s)	3.167	0.168	0.183	0.193	0.412	0.415
Hg(1 s)	2.879	0.178	0.172	0.179	0.372	0.375

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

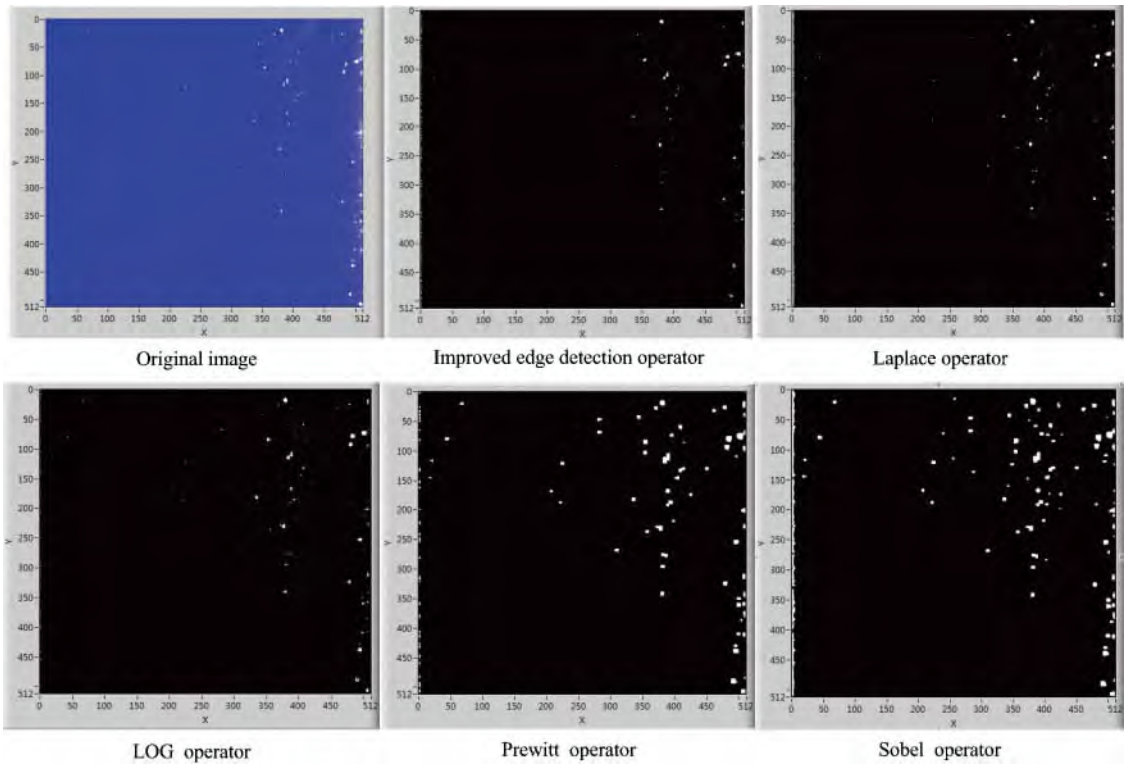

图 7 不同算法背景去除效果图

Fig. 7 The result of different algorithm for background removal

表 2 不同算法的波长提取误差(纳米)

Table 2 Wavelength detection error of different algorithm(nanometer)

Sensitive line	Improved operator	Laplace	LOG	Prewitt	Sobel
227.658(Bi)	0.007	0	Loss	0	0
289.798(Bi)	0	0	0	0	0
306.772(Bi)	0.006	0	0	0	0
259.94(Fe)	0.01	0.01	0.01	0	0
261.187(Fe)	0	0	0	0	0
274.932(Fe)	0	0	Loss	0	0
275.574(Fe)	0.01	0.01	Loss	0	0
330.259(Zn)	0	0	0	0	0.003
334.502(Zn)	0.001	0.001	0.001	0	0.001
472.516(Zn)	0	0	0	0	0
481.053(Zn)	0	0	0	0	0
253.652(Hg)	0.001	0	0.001	0.001	0.001
296.728(Hg)	0	0.001	0	0	0
312.567(Hg)	0.003	0.002	Loss	0.002	0
313.155(Hg)	0	0	0	0	0
365.015(Hg)	0	0	0	0	0
404.656(Hg)	0	0	0.01	0	0
435.833(Hg)	0	0	0	0	0
546.075(Hg)	0	0	0	0	0

结合图 7 分析表 1 数据，经过背景去除后程序的运行速度均得到了显著提高。基于点检测的边缘检测算法(Improved operator，Laplace，LOG)比基于线检测的算法(Prewitt，Sobel)运行速度快。原因是线检测得到的边缘图像需要进行形态学膨胀处理消除光斑的空心现象，增加了算法复杂程度，而且使背景去除后的光斑大于真实光斑。对比基于点检测的三种算子，本文所用算子和拉普拉斯算子运行速度略快于 LOG 算子，原因是 LOG 算子采用 5×5 像素模板，增加了运算量。

对去除背景后的图像进行波长还原，相比于直接对图像提取波长的结果各算法波长提取精度如表 2 所示。

分析表 2 数据可以得出，LOG 算法出现丢点现象，原因是其采用 5×5 像素的模板易于丢失比模板小的光斑。各算法波长提取精度整体较高，基于线检测的算法波长提取精度略高于基于点检测的精度，最高误差不大于 0.001 nm(与仪器理论分辨率相当)，即该误差在可以容许的范围之内。本文提出的算子与拉普拉斯算子具有相近的运行速度和精度，但边缘图像阈值更易选取，不会与有效光斑混淆。

4 结 论

中阶梯光栅光谱仪谱图背景去除对其数据处理速度的提升具有非常重要的意义。本文分析了中阶梯光栅光谱仪二维图像的特点及其给图像处理带来的困难，并在此基础上提出了基于边缘检测的背景去除算法、进行了实验验证。得出以下结论：(1)中阶梯光栅光谱仪图像具有有效光斑覆盖像素数少、谱图背景不确定性大、有效光斑强度幅值跨度大等特点。(2)无论拍摄环境和积分时间等因素如何变化，边缘图

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

像总是易于提取全局阈值，可以利用边缘图像的分割达到原始图像背景去除的目的。(3)相比基于线检测的算法，基于点检测的算法运行速度快、背景去除效果好，虽然波长提取精度略低但仍在误差容限之内。因此选择基于点检测的算法综合性能最优。(4)对于基于点检测的算法，本文提出的算子与拉普拉斯、LOG 算子相比边缘图像阈值更易选取、没有特征点遗漏，更适合用于中阶梯光栅光谱仪的谱图背景去除。(5)本文算法应用于中阶梯光栅光谱仪谱图背景去除，使整个谱图处理算法速度提高十几倍，对波长提取精度的影响小于 0.01 nm 在容差范围之内，能够满足仪器的使用要求。

References

[1] Oleg Korablev, Franck Montmessin, Alexander Trokhimovsky. Optics, 2013, 52(5): 1054.

[2] Sarah C, Jantzi Jose′, Almirall R. Applied Spectroscopy, 2014, 68(9): 963.

[3] Jean-Francois Lavigne, Doucet M, Wang M, et al. SPIE, 2010, 7735.

[4] Becker-Ross H, Florek S, Heitmann U, et al. Spectrochimica Acta Part B, 2006, 61(3): 1014.

[5] CHEN Shao-jie, Bayanheshig, PAN Ming-zhong, et al(陈少杰，巴音贺希格，潘明忠，等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2013, 33(10): 103001.

[6] Zhou Long, Fang Ming, Wang Xue-zhi, et al. SPIE, 2009, 7489.

[7] Wangand W X, Xu J Y. SPIE, 2012, 8292: D.

[8] Cai Aiping, Xiong Xiaomei. SPIE, 2013, 8878: 30.

[9] TANG Yu-guo, CHEN Shao-jie, Bayanheshig, et al(唐玉国，陈少杰，巴音贺希格，等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(10): 2130.

[10] ZENG Huan, WANG Hao(曾　欢，王　浩). Modern Electronics Technique(现代电子技术), 2006, 14, 53.

[11] MO Shao-qing, LIU Zheng-guang, ZHANG Jun, et al(磨少清，刘正光，张　军，等). Journal of Optoelectrinics Laser(光电子激光), 2011, 22(8): 1246.

Algorithm for Background Removal in Spectral Image of Echelle Spectrometer

YIN Lu[1,2], Bayanheshig[1*], YAO Xue-feng[1], CUI Ji-cheng[1], ZHU Ji-wei[1], ZHANG Rui[1,2]

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun　130033, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing　100049, China

Abstract　Echelle spectrometer gets full spectrum by transient direct reading because of the characteristic of cross-dispersion. The two-dimension spectra received by flat-plane detector needs to be reduced to one-dimension spectra so that the effective wavelength can be detected. Because of huge original data and few effective data, background removal plays an important role of decreasing the amount of data and improving data processing speed. The two-dimension spectrum of echelle spectrometer is analyzed and a suitable background removal algorithms is came up. The edge detection method is applied to diffuse spot detection. Selecting appropriate operator to convolute original image to get edge image and calculating global threshold to segment edge image which can be used to map original image to get the background removed image. Two-dimensional spectral images based on different elements at different integration time are used to judge the effect of different background removal algorithm and different operator are analyzed to figure out their effect of speed and accuracy for algorithm. Experimental result shows that the algorithm came up by this letter is better for image background removal than the others. The background removed image can be used in spectrum reductionand the speed of data processing is notable promoted.

Keywords　Echelle spectrometer; Image processing; Background removal; Edge detection; Image segmentation

* Corresponding author

(Received Apr. 20, 2015; accepted Aug. 11, 2015)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net