

# 基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰定位方法

于坤<sup>1</sup>, 焦青亮<sup>1</sup>, 刘子龙<sup>1,2\*</sup>, 蒋依芹<sup>2</sup>, 张巧香<sup>2</sup>, 刘玉芳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>河南师范大学物理与材料科学学院, 河南 新乡 453007;

<sup>2</sup>中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100029

**摘要** 针对目前光谱特征峰识别定位技术识别率低、定位误差大、无法获得光谱线型函数等问题, 提出了一种基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法。该方法利用动态转换概率改进正弦余弦算法, 将改进的正弦余弦算法与多种光谱线型(高斯、洛伦兹和 Voigt)拟合方法相结合, 通过迭代寻优计算, 最终得到对应的光谱特征峰位置。该方法不仅能得到光谱特征峰的位置, 而且可以得到光谱线型函数。实验证明, 无论强峰、弱峰还是重叠峰, 提出的基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法在识别率、定位准确率、谱值拟合效果和抑制噪声的能力等方面均有显著提高。

**关键词** 光谱学; 特征峰识别与定位; 正弦余弦算法; 光谱线型函数

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0930008

## Positioning of Characteristic Spectral Peaks Based on Improved Sine Cosine Algorithm

Yu Kun<sup>1</sup>, Jiao Qingliang<sup>1</sup>, Liu Zilong<sup>1,2\*</sup>, Jiang Yiqin<sup>2</sup>, Zhang Qiaoxiang<sup>2</sup>, Liu Yufang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Physics & Materials Science, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China;

<sup>2</sup> Division of Optics, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

**Abstract** In order to solve the problems of traditional characteristic spectral peak recognition and positioning methods, such as low recognition rate, large positioning error, and being unable to obtain spectral line-shape function, we propose a characteristic spectral peak recognition and positioning method based on an improved sine cosine algorithm. A sine cosine algorithm is improved by dynamic conversion probability, and then combines with the fitting methods of various spectral line-type functions (Gaussian, Lorentzian, and Voigt). The corresponding positions of characteristic spectral peaks can be obtained by iterative optimization. The improved method can not only locate characteristic peaks precisely, but can also obtain the line-type function of the spectrum. The experiments show that the proposed method significantly improves the recognition rate, positioning accuracy, peak fitting effect, and noise suppression ability for strong, weak, and overlapping peaks.

**Key words** spectroscopy; feature peak recognition and positioning; sine and cosine algorithm; spectral line-shape function

**OCIS codes** 300.6190; 120.3940; 120.6200

## 1 引 言

光谱特征峰的识别与定位不仅是光谱类仪器计量检定中的关键步骤, 而且在物质定量分析、成分识别等方面具有至关重要的作用<sup>[1-4]</sup>。例如, 在分光光度计的计量检定过程中, 由于各种滤光片标准物质的有效峰数量较多, 且分光光度计测定的不同种类

滤光片标准物质的光谱峰位置与大小存在差异, 如何准确快速地找到光谱特征峰位置是实现精确计量的关键。

已有很多学者对光谱寻峰算法进行了研究, 如传统的数值比较法、导数算法<sup>[5]</sup>、连续小波变换算法<sup>[6]</sup>、对称零面积变换算法<sup>[7]</sup>、指数修正高斯拟合算法<sup>[8-9]</sup>、多尺度谱峰定位算法<sup>[10-11]</sup>、傅里叶自去卷积

收稿日期: 2019-03-12; 修回日期: 2019-05-07; 录用日期: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61875180)、国家重点研发计划(2017YFF0205103)、河南师范大学研究生科研创新重点项目(YL201801)

\* E-mail: liuzl@nim.ac.cn

法<sup>[12]</sup>。这些算法虽然能够实现光谱寻峰,但是通常对光谱的信噪比、动态范围和光谱特征等有较高要求,如导数算法无法检测重叠严重的特征峰,小波变换算法无法准确检测特征峰的中心波长位置,对称零面积变换算法如果基函数选择不合适将会导致较大的误差,高斯拟合算法需要待测光谱特征峰为高斯线型。

Mirjalili 等<sup>[13]</sup>针对常见寻优算法和正弦余弦函数的特性与规律进行研究,提出一种启发式智能寻优算法——正弦余弦算法(SCA)。该寻优算法结构简单,但是标准正弦余弦算法存在局部最优解识别率低、大规模数据寻优收敛较慢、光谱数据维数多、数据量过大等问题。鉴于此,本文在标准正弦余弦算法的基础上利用自适应转换概率替代传统的转换概率,结合光谱线型拟合方法,不仅有效提高了光谱特征峰识别的准确度,而且可以获得光谱的线型函数种类。该方法对光谱的信噪比和动态范围要求较低,在很大程度上提高了光谱特征峰的识别率和准确度,能够有效减小光谱仪器计量检定、光谱成分分析等过程中的误差。

## 2 定位方法

### 2.1 改进的正弦余弦算法

标准正弦余弦算法的具体步骤如下。

1) 在  $n$  维解集合中随机挑选  $m$  个不同的个体。

2) 计算每一个个体的适应度,定义当前最优个体为  $B \in \{B_1, B_2, B_3, \dots, B_n\}$ 。

3) 对每个个体进行迭代更新,以第  $i$  个个体为例,更新方程为

$$X_i^{(t+1)} = \begin{cases} X_i^{(t)} + r_1 \times \sin r_2 \times |r_3 B_i \times X_i^{(t)}|, & r_4 < a \\ X_i^{(t)} + r_1 \times \cos r_2 \times |r_3 B_i \times X_i^{(t)}|, & r_4 \geq a \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $t$  为当前迭代次数( $t \leq T$ )。 $r_1, r_2, r_3, r_4, a$  均为正弦余弦算法中的参数。 $a$  是一个常数,一般设置为 0.5。 $r_1$  为一个常数,主要作用是决定该个体在本次迭代中产生新个体的位置方向; $r_2$  是一个在闭区间 $[0, 2\pi]$ 上服从均匀分布的随机数,将决定该个体在本次迭代中产生新个体的距离; $r_3$  是区间 $[0, 2]$ 上的一个随机权重,其大小将决定当前最优解对该个体当前迭代作用的大小; $r_4$  是在区间 $[0, 1]$ 上的一个随机数,是正弦余弦算法在正弦函数和余弦函数中的转换概率,称为转换系数,当转换系数

$r_4$  小于  $a$  时,正弦余弦算法在该次迭代时按照正弦规律迭代,反之,根据余弦规律进行迭代。

4) 重复执行上述步骤,直至满足预先设置的迭代停止条件或者达到最大迭代次数(迭代停止条件与最大迭代次数需要根据不同问题的特性进行设置),即可得到所需结果。

光谱数据具有数量大、维数多、信噪比低等特点,标准正弦余弦算法存在局部最优解跳出率较低、寻优精度低等一系列问题。针对这些问题,提出了一种自适应转换概率。与标准正弦余弦法的固定转换概率相比,自适应变化的转换概率可以更好地控制全局搜索和局部挖掘进程,有助于正弦余弦算法跳出局部最优解,提高算法的收敛精度。具体实现方式为

$$b = \begin{cases} b + \text{rand}(0, 0.4), & L < M - 0.05 \\ 0.5, & M - 0.05 \leq L < M + 0.05 \\ b - \text{rand}(0, 0.5), & L \geq M + 0.05 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $b$  为转换概率,与(1)式中  $a$  意义相同; $L$  为所有解与当前最优解的欧氏距离的平均值; $M$  为设置的参数,用于控制全局搜索和局部挖掘两大步骤的转换; $\text{rand}(0, 0.4)$  表示区间 $[0, 0.4]$ 上服从均匀分布的一个随机数。解经过(1)式更新后,若全体解与当前最优解的欧氏距离远大于设定值,则认为算法在全局搜索阶段,需要相应地缩小  $b$ ,使得下次迭代大概率进行全局搜索;若全体解与当前最优解的欧氏距离远小于设定值,则认为算法在局部挖掘阶段,则需要相应增大  $b$ ,使得下次迭代大概率进行局部挖掘;若全体解与当前最优解的欧氏距离差别不大时,则认为算法正在全局搜索和局部挖掘的过渡阶段,此时令  $b$  为 0.5,下次迭代随机进行全局搜索或局部挖掘。

### 2.2 光谱线型拟合

发光粒子的能级结构、运动速度及粒子间的相互碰撞使得光谱线分为均匀展宽、非均匀展宽和综合展宽三种类型<sup>[14]</sup>,这三种展宽将会形成高斯线型、洛伦兹线型<sup>[15]</sup>和 Voigt 线型<sup>[16]</sup>,具体形式为

$$G(\nu, \nu_0) = \alpha \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{\alpha_L^2}\right], \quad (3)$$

$$Q(\nu, \nu_0) = \frac{1}{\pi} \frac{\alpha_L}{(\nu - \nu_0)^2 + \alpha_L^2}, \quad (4)$$

$$V(\nu, \nu_0) = kQ(\nu, \nu_0) + (1 - k)G(\nu, \nu_0), \quad (5)$$

式中: $\alpha_L$  为线型半峰全宽(高斯线型和洛伦兹线型); $\nu_0$  为被测物质光谱特征峰的中心频率; $\nu$  为光谱频率; $k$  为合成因子,是开区间 $(0, 1)$ 上的一个定

值; $\alpha$ 表示高斯线型的最大值,即光谱峰值大小。同理,可以得到洛伦兹线型的最大值为

$$Q_{\max} = \frac{1}{\pi\alpha_L} \quad (6)$$

采用高斯、洛伦兹和 Voigt 混合拟合的方法可以识别大部分光谱特征峰。对一些并非高斯线型、洛伦兹线型或 Voigt 线型的光谱特征峰,提出的方法会出现一定的识别误差,最终得到的光谱线型函数也会出现偏差。大部分光谱特征峰为高斯线型、洛伦兹线型或者 Voigt 线型中的一种,因此本文提出的方法适用于绝大多数光谱。

### 2.3 实现方法

随机筛选  $p$  组不同的波长组,每组波长含有  $q$  个不重复的波长,其中  $q$  为光谱特征峰的个数。区间扩展之后,利用高斯线型拟合、洛伦兹线型拟合或者近似 Voigt 线型拟合,以拟合的误差均方根为适应度函数的值,通过正弦余弦算法的迭代原理,不断地将被挑选出的波长向适应度函数最小的方向进行迭代。最小误差均方根对应的结果,即为被测物质光谱特征峰对应的波长。具体步骤如下:

1) 确定预设参数,即波长的扩展范围  $X$ 、允许重叠的比例  $Y$  和特征峰的个数,设置最大迭代次数与停止迭代的条件;

2) 获取光谱数据,并随机产生  $p$  组随机波长;

3) 根据  $X$  对被选择的波长进行扩展,判断两波段间的重合比例;

4) 如该比例大于  $Y$ ,则重新选择波长,直至被选择的波段中任意两波段的重合比例均小于  $Y$ ;

5) 分别利用高斯线型、洛伦兹线型和 Voigt 线型函数对每个被选择的波段进行拟合,计算误差均方根,取其中最小的拟合误差均方根为适应度函数的值;

6) 利用(1)式改进正弦余弦算法更新被选择波长;

7) 重复步骤 3)~6),直至满足迭代停止条件,若在迭代过程中无法满足寻优条件,则达到最大迭代次数时,退出迭代,即可得到被测物质的光谱特征峰识别定位结果与被测物质的光谱线型函数类型。

## 3 实验与讨论

使用美国瓦里安公司 Cary5000 紫外-可见-近红外分光光度计采集光谱数据,该分光光度计拥有极高的信噪比和分辨率。根据计量检定规程,在分光光度计及其类似仪器的计量检定中,紫外区的计量检定采用氧化钛滤光片标准物质,可见光区则采用镨钕滤光片标准物质。实验采用中国计量科学研究院提供的镨钕滤光片标准物质和氧化钛滤光片标准物质为实验样本,实验环境温度为 298.5 K,相对湿度为 23%。为了使光谱数据足够精确,采集过程中对所有样本多次扫描,排除异常数据后计算平均值,以此作为最终的光谱数据,结果如图 1 所示。

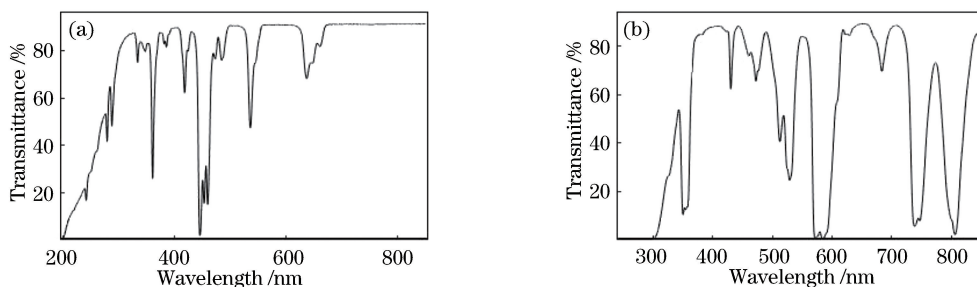


图 1 实测光谱图。(a)氧化钛滤光片;(b)镨钕滤光片

Fig. 1 Measured spectrograms. (a)  $\text{H}_2\text{O}_2$  filter; (b) Pr-Nd filter

为了验证方法的可靠性与优越性,将传统的三阶导数法、对称零面积变换法和基于正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法作为对照。一方面判断提出方法对光谱峰的识别是否全面,以识别率为评价指标;另一方面评价光谱特征峰中心波长的定位准确度与光谱峰值的拟合程度,以均方根误差为评价指标;此外还讨论了该方法的运行时间和对噪声的敏感性。根据计量检定规程 JJG 1034—2008 4.1

节和附录 A 中对光谱半峰全宽、相对峰高的定义,在光谱仪、滤光片计量工作中通常认定光谱特征峰相对峰高大于 35% 的峰为强峰,其余认定为弱峰,当某一光谱特征峰不具有对称性时可以认定为重叠峰。两种标准物质的光谱特征峰具体位置和类型如表 1 所示。仿真中三阶导数法和对称零面积变换法的窗口长度为 24 nm,对称零面积变换法采用高斯函数为基函数,特征峰识别定位方法的最大迭代次

数为 100, 每代有 15 个个体, 当最小适应度函数的值小于 0.5 时, 正弦余弦算法停止迭代。

表 1 镨钕滤光片和氧化钬滤光片标准物质特征峰

Table 1 Characteristic peaks of certified reference materials for Pr-Nd filters and Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filters

No.	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub> filter		Pr-Nd filter	
	Peak position / nm	Peak type	Peak position / nm	Peak type
1	241.7	Weak	351.1	Strong
2	279.3	Weak	431.2	Weak
3	288.0	Weak	461.4	Weak
4	333.9	Weak	473.5	Weak
5	347.7	Weak	513.4	Strong
6	360.9	Strong	529.8	Strong
7	381.0	Weak	572.7	Weak
8	385.8	Weak	585.7	Strong
9	418.6	Strong	624.4	Weak
10	446.1	Strong	684.8	Weak
11	453.6	Weak	739.2	Strong
12	460.0	Strong	748.3	Weak
13	473.3	Weak	807.7	Strong
14	484.9	Weak		
15	536.6	Strong		
16	637.8	Weak		
17	649.5	Weak		
18	662.4	Weak		

### 3.1 识别率评价

为减小随机设置参数带来的误差, 将该方法独立重复运行 50 次, 取最优值为最终结果。表 2 为四种特征峰识别定位方法的光谱峰识别率结果。

表 2 谱峰识别率

Table 2 Peak recognition rate

Algorithm	Peak recognition rate		
	Strong	Weak	Overlapping
	peak / %	peak / %	peak / %
Third-order derivative algorithm	100	60*	37.1*
Symmetric zero-area algorithm	100	90*	56.3
SCA	100	85	59.6
Improved SCA	100	95	87.4

\* indicates that the incorrect recognition case exists.

通过表 1 可以看出, 针对光谱图中较为明显的强峰, 三阶导数法、对称零面积变换法、基于正弦余弦算法的特征峰定位方法和本文方法都可以达到 100% 识别率, 这表明对于光谱峰值较大的强峰, 几种方法均有较强的特征峰识别定位能力, 因此在较为简单的谱线上, 包括本文方法在内的四种方法均为有效的解决方案。对峰值较小的弱峰, 三阶导数法对光谱峰的判断出现缺失, 而且三阶导数法出现了将噪声信号判断为光谱峰的情况; 基于正弦余弦算法的特征峰定位方法也未能检测到一些弱峰。对称零面积变换法对弱峰的识别率高达 90%, 本文方法对弱峰的识别率为 95%, 这表明这两种方法可以识别光谱中峰值较小的特征峰, 有较强的识别能力。因此, 当光谱图中出现有噪声干扰且较弱的谱峰时, 对称零面积变换法和本文提出的方法是较为理想的光谱特征峰定位方法。针对光谱中出现的重叠峰, 三阶导数法和对称零面积变换法均可识别重叠峰中较为明显的一个峰而遗漏另外一个峰值较低的峰, 基于正弦余弦算法的特征峰识别定位方法有一定的重叠峰识别效果, 但不如基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法, 这充分说明自适应转换概率可以有效提高标准正弦余弦算法跳出局部最优解的能力。因此当谱线中出现重叠峰时本文方法可以获得令人满意的结果。

### 3.2 准确性分析

准确性分析同样将光谱特征峰分为强峰、弱峰和重叠峰三个类型, 以光谱特征峰中心波长的均方根误差 (RMSE)、光谱特征峰峰值大小的均方根误差和算法运行时间为评价依据。具体计算公式为

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\lambda_i - \lambda'_i)^2}{N}}, \quad (7)$$

式中:  $N$  为寻找的波峰个数;  $\lambda$  为本文特征峰识别定位方法得到的光谱峰中心波长 (或峰值);  $\lambda'$  为标准光谱峰的波长 (或峰值)。四种算法的仿真结果见表 3~5, 其中未识别光谱峰和错误识别的光谱峰均已去除。

表 3 为光谱特征峰中心波长的均方根误差。从表中可以看出, 对于较为明显的强峰, 四种算法得到的谱峰均方根误差相似且较小, 因此对于简单的光谱特征峰识别定位任务, 四种算法均可获得令人满意的结果。对于光谱峰值较弱的情况, 可以看出改进方法的特征峰定位精确度高于对称零面积变换法, 而对称零面积变换法和基于正弦余弦算法的特

征峰识别定位方法相似,均好于三阶导数法。这表明光谱中存在弱峰时,本文方法可以获得较为满意的结果。当光谱中出现重叠峰时,三阶导数法针对重叠峰的特征峰定位能力最差,对称零面积变换法和基于正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法定位能力相似,基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法获得了最小的均方根误差,而且该方法得到锗钹滤光片和氧化钛滤光片两种标准物质的光谱线型函数均为洛伦兹线型函数。

表 4 为光谱特征峰峰值的均方根误差。从表中可以看出,对于强峰,所有方法对峰值的拟合效果都很好。对于弱峰和重叠峰,基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法拟合效果最好,对称零面积变换法拟合效果最差。从算法原理来看,对称零面积变换法需要首先设置一个对称函数模型,然后对光谱进行拟合;三阶导数法直接对光谱进行最小二乘法拟合;基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法使用高斯函数、洛伦兹函数和 Voigt 函数等光谱线型函数对待测光谱进行拟合。由于改进方法引入了自适应转换概率,增强了标准正弦余弦算法跳出局部最优解的能力,所以,基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法可以获得最小的均方根误差。

表 5 为各种方法运行时间的对比。从表中可以看出,除三阶导数法可以快速识别定位光谱特征峰外,其他三种光谱特征峰识别定位方法均需耗费一定的时间。对称零面积变换法和基于正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法运行时间相近;基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法由于引入了自适应转换概率,计算量加大,运行时间稍长,但自适应转换概率有助于正弦余弦算法快速收敛,所以与对称零面积变换法和基于正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法的运行时间相比,相差并不大。

表 3 光谱峰中心波长的均方根误差

Table 3 RMSE of spectral peak central wavelength

Algorithm	RMSE /pm		
	Strong peak	Weak peak	Overlapping peak
Third-order derivative algorithm	1.60	8.19	15.71
Symmetric zero-area algorithm	1.49	7.81	11.33
SCA	1.55	7.88	11.04
Improved SCA	1.53	5.20	9.12

表 4 光谱峰值准确度的均方根误差

Table 4 RMSE of spectral peak value accuracy

Algorithm	RMSE /%		
	Strong peak	Weak peak	Overlapping peak
Third-order derivative algorithm	0.12	3.57	3.91
Symmetric zero-area algorithm	0.16	3.93	3.94
SCA	0.11	3.44	3.50
Improved SCA	0.11	3.20	3.37

表 5 运行时间

Table 5 Run time

Algorithm	Time /s
Third-order derivative algorithm	4.61
Symmetric zero-area algorithm	31.37
SCA	30.71
Improved SCA	36.14

### 3.3 噪声敏感性分析

在获取光谱数据的过程中,不可避免地会受到噪声干扰<sup>[17]</sup>,噪声会增加光谱特征峰在识别定位时的不确定性。各个噪声源通常相互独立,根据中心极限定理,光谱数据中的噪声一般为高斯白噪声。因此,在噪声敏感性分析中,分别将不同信噪比下的高斯白噪声加入被测光谱中,以光谱特征峰中心波长定位结果的均方根误差为评价指标。

图 2 所示为添加不同信噪比的高斯白噪声后得到的光谱特征峰识别定位结果。从图中可以看出,四种光谱特征峰识别定位方法对噪声均有一定的抑制能力。对于光谱中较强的特征峰,随着添加噪声信噪比的减小,四种方法的识别效果变化均较小;对于光谱中的弱峰,三阶导数法抑制噪声能力弱于其他方法,对称零面积变换法与基于正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法相似,但是与基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法有明显的差距。基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法不仅误差最小,而且对信噪比不断减小的噪声具有较强的抑制能力。对于光谱数据中的重叠峰,三阶导数法的抑制噪声能力最差,对称零面积变换法与基于正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法相似,基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法因为引入了自适应转换概率而获得了最优光谱特征峰识别定位结果。由此可见,改进的正弦余

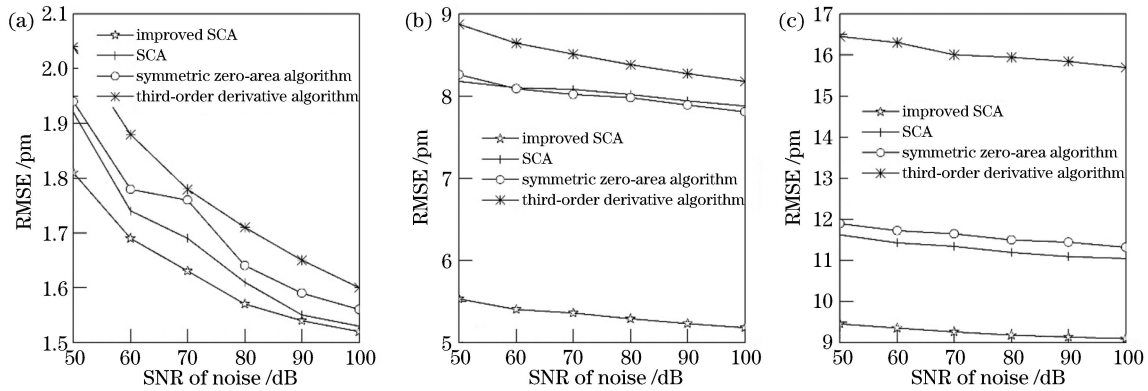


图 2 添加不同信噪比的高斯白噪声后得到的光谱特征峰识别定位结果。(a)强峰;(b)弱峰;(c)重叠峰

Fig. 2 Wavelength localization results of spectral characteristic peaks with Gaussian white noise of different signal-to-noise ratios added. (a) Strong peak; (b) weak peak; (c) overlapping peak

弦算法在不同信噪比的噪声下仍然可以获得较高的定位精度。

## 4 结 论

利用改进的正弦余弦算法结合光谱线型拟合方法实现了光谱特征峰识别、定位以及光谱线型函数类型的获取。实验结果表明,与对称零面积变换法等传统的光谱特征峰识别定位方法相比,提出的基于改进正弦余弦算法的光谱特征峰识别定位方法的运行时间虽然不占优势,但在光谱特征峰的识别率、对光谱特征峰的定位能力、光谱特征峰峰值的拟合程度以及对噪声的稳健性等性能方面均有显著提升。该方法不仅可以提高对重叠峰的识别定位能力,而且对弱峰的定位能力也有了显著提高。利用该方法能够有效提高光谱分析仪器的特征峰定位精度、准确度和抗噪声能力,在光学计量、光谱分析等领域有较好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Herz F, An Z H, Komiyama S, *et al.* Revisiting the dipole model for a thermal infrared near-field spectroscope[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(4): 044051.
- [2] Wang Z H, Chen C, Qian C H, *et al.* Spectrometer wavelength error correction method based on particle swarm optimization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(10): 2430-2436.  
王智宏, 陈琛, 千承辉, 等. 基于粒子群寻优的光谱仪波长误差修正方法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(10): 2430-2436.
- [3] Liu Z L, Chen R, Liao N F, *et al.* Greatly enhanced visual density measurement level of the national standard densitometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 230601.
- [4] Sun C, Yao X F, Cui J C, *et al.* Mineral spectrum measurement based on shortwave infrared imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0230001.  
孙慈, 姚雪峰, 崔继承, 等. 基于短波红外成像光谱仪的矿石光谱测量[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0230001.
- [5] Lu J, Trnka M J, Roh S H, *et al.* Improved peak detection and deconvolution of native electrospray mass spectra from large protein complexes [J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2015, 26(12): 2141-2151.
- [6] Zhang Z M, Tong X, Peng Y, *et al.* Multiscale peak detection in wavelet space[J]. *Analyst*, 2015, 140(23): 7955-7964.
- [7] Bi Y F, Li Y, Du Z F, *et al.* Automatic recognition of overlapped spectral peaks by combined symmetric zero-area conversion and L-M fitting [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(8): 2339-2342.  
毕云峰, 李颖, 杜增丰, 等. 对称零面积变换结合 L-M 拟合自动识别重叠光谱峰[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(8): 2339-2342.
- [8] Hu Z W, Pang C X, Cheng F Y. Application of Gaussian-LM algorithm in fiber Bragg grating reflection spectrum peak search [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 013001.  
胡正文, 庞成鑫, 程冯宇. Gaussian-LM 算法在光纤布拉格光栅反射光谱寻峰中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 013001.
- [9] Yu Y L, Wang X W, Wang H. Analysis of peak-detection algorithms in fiber Bragg grating by

- different sampling methods [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(11): 1274-1278.
- 余有龙, 王雪微, 王浩. 不同采样方式下光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法的分析[J]. *光子学报*, 2012, 41(11): 1274-1278.
- [10] Jiang C Z, Sun Q, Liu Y, *et al.* A new peak detection algorithm of Raman spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(1): 103-107.
- 姜承志, 孙强, 刘英, 等. 基于双尺度相关运算的拉曼谱峰识别方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(1): 103-107.
- [11] Jiang C Z, Sun Q, Liu Y, *et al.* Peak detection algorithm of Raman spectra based on multi-scale local signal-to-noise ratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0630001.
- 姜承志, 孙强, 刘英, 等. 基于多尺度局部信噪比的拉曼谱峰识别算法[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0630001.
- [12] Zheng J B, Zhang H Q, Gao H. Wavelet Fourier self-deconvolution method [J]. *Science in China (Series B)*, 2000, 30(1): 21-27.
- 郑建斌, 张红权, 高鸿. 小波 Fourier 自去卷积法[J]. *中国科学(B辑)*, 2000, 30(1): 21-27.
- [13] Mallick A, Prasad D K, Behera P P. Stresses in radiative annular fin under thermal loading and its inverse modeling using sine cosine algorithm (SCA) [J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2019, 42(4): 401-415.
- [14] Thomas L, Boffety M, Goudail F. Improving target discrimination ability of active polarization imagers by spectral broadening [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33514-33528.
- [15] Liu M H, Dong Z R, Xin G F, *et al.* Discrimination method of Raman spectral peaks based on Voigt function fitting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0511003.
- 刘铭晖, 董作人, 辛国锋, 等. 基于 Voigt 函数拟合的拉曼光谱谱峰判别方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0511003.
- [16] Li T T, Yang F, Li S G, *et al.* Extraction method of line-structured light stripe center based on Gauss-Lorenz decomposition peak fitting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 071201.
- 李涛涛, 杨峰, 李石庚, 等. 基于高斯-洛伦兹分峰拟合的线结构光条中心的提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 071201.
- [17] Yang A P, Wang J B, Yang B W, *et al.* Joint deep denoising prior for image blind deblurring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1010003.
- 杨爱萍, 王金斌, 杨炳旺, 等. 联合深度去噪先验图像盲去模糊[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1010003.