

基于准分子激光绝对波长校准的寻峰算法研究

袁靖超^{1,2,3}, 赵江山^{1,2}, 李慧^{1,2}, 刘广义^{1,2}

¹中国科学院光电研究院投影光学室, 北京 100094;

²北京市准分子激光工程技术研究中心, 北京 100094;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 准分子激光绝对波长校准技术中,参考中心波长位置抖动是影响校准精度的主要因素,寻峰算法是解决这类问题的有效途径。通过仿真和实验研究比较了 5 种寻峰算法,结果显示,高斯非线性曲线拟合寻峰法误差最小,算法平均误差为 0.15 pm。通过研究强度阈值对 5 种寻峰算法的影响,明确了阈值优化对减小寻峰算法误差的重要性。选取各算法最佳强度阈值来优化算法,结果表明,高斯非线性曲线拟合寻峰算法的误差最低为 0.04 pm,平均算法误差为 0.06 pm,选取该寻峰算法作为绝对波长校准核心算法,能满足校准精度要求。通过对影响算法的误差原因进行分析,证明噪声大小是影响高斯非线性曲线拟合寻峰算法误差的主要因素,进一步提升校准精度须从抑制噪声角度出发。

关键词 光谱学; 准分子激光器; 绝对波长校准; 寻峰算法; 高斯非线性曲线拟合

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0701003

Research of Peak-Detection Algorithm Based on Absolute Wavelength Calibration of Excimer Laser

Yuan Jingchao^{1,2,3}, Zhao Jiangshan^{1,2}, Li Hui^{1,2}, Liu Guangyi^{1,2}

¹Department of Projection Optics Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²Beijing Excimer Laser Technology and Engineering Center, Beijing 100094, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Position shaking of reference center wavelength is the main factor which affects the accuracy of absolute wavelength calibration. In this case, peak-detection algorithms are proposed to find the real-time position of center wavelength. Five peak-detection algorithms are analyzed and compared by simulations and experiments. The error of Gaussian nonlinear curve fitting algorithm is 0.15 pm, which is the lowest in all the test algorithms. The influence of power threshold value upon the five peak-detection algorithms is studied, and the importance of threshold optimization is clear and definite for reducing peak-detection errors. After threshold value optimization, the Gaussian nonlinear curve fitting algorithm performs the best, as its lowest error is 0.04 pm and the average error is 0.06 pm. Thus, Gaussian nonlinear curve fitting algorithm meets the requirement of calibration accuracy. By analyzing factors which cause error in the peak-detection algorithms, we find that the signal noise ratio turns out to be the major factor which dominates the errors of Gaussian nonlinear curve fitting algorithm. Therefore, noise suppression is the best way to achieve high overall accuracy of absolute wavelength calibration.

Key words spectroscopy; excimer laser; absolute wavelength calibration; peak-detection algorithm; Gaussian nonlinear curve fitting

OCIS codes 300.1030; 140.1340; 120.1880

收稿日期: 2017-12-26; 收到修改稿日期: 2018-02-11

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX02206-01)

作者简介: 袁靖超(1992—),男,硕士研究生,主要从事准分子激光器波长测量及校准方面的研究。

E-mail: yuanjingchao15@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 赵江山(1974—),男,博士,研究员,硕士生导师,主要从事准分子激光器、固体激光技术、超短脉冲激光技术及相关激光器件、非线性光学技术及相关超快现象过程和技术等方面的研究。E-mail: zhaojiangshan@aoe.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

准分子激光器波长的精确控制是集成电路芯片制备中的重要技术之一,测量控制精度须达亚皮米量级^[1]。为提高波长测量系统的精度、减小测量误差,绝对波长校准是一项重要的技术途径^[2]。

绝对波长校准是指提供一条或多条高稳定性、高精度的已知波长作为标准波长(也称参考波长)用于校准波长测量控制系统的误差,以提高测量精度的技术方法。标准波长通常由特殊元素(元素空心阴极灯)提供,其原理是处在等离子体状态的元素会与特定波长的激光相互作用共振,使得等离子体吸收部分激光,从而导致激光束光强锐减。本文通过探测激光束光强形式获得元素吸收谱,吸收谱峰值位置为已知参考中心波长^[3-4]。绝对波长校准技术的关键是测量高精度的参考中心波长位置。

事实上,受激光器本身因素,如频率抖动、能量稳定性、调谐步长等因素,以及校准系统中探测器件响应、元素灯稳定性等的综合影响,参考中心波长位置严重抖动,无法满足 0.05 pm 的绝对波长校准精度要求^[5]。解决参考中心波长位置抖动问题,寻峰是关键。研究表明,寻峰算法是解决这类问题最有效的途径^[6]。

本文通过仿真和实验研究比较了 5 种寻峰算法,并通过最佳强度阈值来优化各种算法,证实了将高斯非线性曲线拟合寻峰算法用作绝对波长校准核心算法的合理性——其误差最低为 0.04 pm,平均误差为 0.06 pm。

2 寻峰算法的基本原理

2.1 质心探测寻峰算法

质心探测寻峰算法^[7]实质上是一种实验统计方法,其原理就是把采集到的数据点视为质量非均匀质点,在质点系中,质点的位矢对应于 X 轴,质点的质量对应于 Y 轴,质点系质心可表示为

$$x_0 = \sum x_i \lambda_i / \sum y_i. \quad (1)$$

质心探测寻峰法又称功率加权法^[8]。在绝对波长校准中,以激光光强为权重比,波长中心位置在元素吸收谱的加权平均值处,此处波长值可作为探测吸收谱的峰值波长,(1)式变为

$$\lambda_0 = \sum \lambda_i I_i / \sum I_i, \quad (2)$$

式中 λ_0 为吸收谱中心波长,即参考中心波长, λ_i 为波长计所测的相对波长, I_i 为光强探测器所测得的

对应光强度值。

2.2 一般多项式拟合寻峰算法

一般多项式拟合寻峰算法^[9]以多项式为拟合函数,以最小二乘法为判定函数,得到参考中心波长位置。一般多项式可表示为

$$P_n(x) = p_n x^n + p_{n-1} x^{n-1} + \dots + p_1 x + p_0. \quad (3)$$

根据实际情况,选用适当的阶数进行吸收谱线拟合,如选用二阶多项式进行拟合,即 $n=2$,则(3)式可表示为

$$P(\lambda) = p_2 \lambda^2 + p_1 \lambda + p_0. \quad (4)$$

若吸收谱采样点 (λ_i, I_i) 个数为 n ,即 $(i=1, 2, \dots, n)$,按最小二乘法,(4)式的偏差平方和 S 为

$$S = \sum_{i=1}^n [I_i - P(\lambda_i)]^2, \quad (5)$$

当 S 取最小值时,即可确定系数 p_0, p_1, p_2 的值,代入(4)式求其一阶微分解析式:

$$p'_2(\lambda) = 2p_2 \lambda + p_1. \quad (6)$$

令解析式 $p'_2(\lambda) = 0$,可得吸收谱中心波长 $\lambda_0 = -p_1/2p_2$ 。

2.3 高斯-多项式拟合寻峰算法

高斯-多项式拟合寻峰算法^[10]以高斯函数经多项式变化后的形式为拟合函数,以最小二乘法为判定函数,得出吸收谱中心波长位置。

吸收谱线近似为高斯分布,可用高斯函数近似表示为^[11]

$$I(\lambda) = I_0 \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta \lambda_0} \right)^2 \right], \quad (7)$$

式中 I_0 为吸收谱强度 I 的幅度值, λ_0 为吸收谱中心波长, $\Delta \lambda_0$ 为吸收谱的 3 dB 带宽。对(7)式两边取对数:

$$\begin{aligned} \ln I(\lambda) = & - \left(4 \ln 2 \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda_0^2} - \ln I_0 \right) + \\ & 8 \ln 2 \frac{\lambda_0}{\Delta \lambda_0^2} \lambda - 4 \ln 2 \frac{1}{\Delta \lambda_0^2} \lambda^2. \end{aligned} \quad (8)$$

令 $P(\lambda) = \ln I(\lambda)$, $p_0 = - \left(4 \ln 2 \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda_0^2} - \ln I_0 \right)$, $p_1 = 8 \ln 2 \frac{\lambda_0}{\Delta \lambda_0^2}$, $p_2 = -4 \ln 2 \frac{1}{\Delta \lambda_0^2}$,可将(8)式变为二阶多项式 $P(\lambda) = p_2 \lambda^2 + p_1 \lambda + p_0$,此时与一般多项式拟合寻峰法一致,得出吸收谱中心波长为 $\lambda_0 = -p_1/2p_2$ 。

2.4 高斯拟合寻峰算法

高斯拟合寻峰算法^[12]是对吸收谱采样后,直接

将高斯函数作为拟合函数,若吸收谱采样点 (λ_i, I_i) 个数为 n ,即 $(i=1, 2, \dots, n)$,以最小二乘法为判定函数,同(5)式得偏差平方和 S ,当 S 取最小值时可确定最佳拟合曲线 $I(\lambda)$,进而得到吸收谱中心波长。

2.5 高斯非线性曲线拟合寻峰算法

高斯非线性曲线拟合寻峰算法^[13-15]以高斯函数为拟合函数,以 Levenberg-Marquardt(L-M)迭代算法判定拟合函数参数,从而确定参考中心波长位置。

L-M算法是一种求解目标函数参数的算法,实质上是在高斯-牛顿算法和非线性梯度下降算法的基础上进行插值处理的优化,因此该算法同时具有高斯-牛顿算法的局部收敛性和非线性梯度下降算法的全局性。L-M算法在对吸收光谱信号进行拟合的处理过程中,通过自适应调整阻尼因子实现收敛^[16]。L-M算法能有效抵制噪声影响,得到高精度结果。

实验得到的元素灯吸收光谱曲线与高斯函数曲线近似,因此可使用高斯函数拟合吸收光谱曲线消除部分信号噪声,且不影响吸收光谱的峰值波长特征。理论上,如果可以确定(7)式高斯函数中 I_0 和 λ_0 为吸收谱中心波长, $\Delta\lambda$ 。这3个参数,实际吸收光谱与通过相应高斯函数拟合的曲线误差最小。然而事实上,信号受多重噪声干扰影响,特别是来自仪器本身的,因此无法从实验所得到的元素吸收谱中直接确定拟合函数的3个参数。为解决这一问题,一般读取大量的原始吸收谱数据来对真实值进行较准确的估计,但这种处理方式数据庞大,信息处理速度缓慢,对于准分子激光绝对波长校准来说不可取。因此,可考虑使用L-M算法优化高斯函数参数的选取。

高斯非线性曲线拟合寻峰法的具体流程:首先,根据实验数据直接寻峰得到高斯函数拟合参数,使用该参数进行曲线拟合;然后,使用L-M算法迭代判断拟合结果,通过其自适应参数调节,优化拟合参数;最后,利用优化后的参数进行曲线拟合,得到与实际吸收谱线误差最小的吸收谱线函数。寻峰流程图如图1所示,电脑采集波长及光强数据,导入到Matlab软件中,使用高斯拟合寻峰算法进行处理,再使用L-M算法将采集的数据迭代后获取最佳高斯拟合参数,最终拟合得到元素吸收谱线,从而确定参考中心波长位置。

3 准分子激光绝对波长校准实验系统

图2所示为准分子激光器绝对波长校准实验装置,由波长调谐装置、激光器、波长计、校准单元,以及计算处理系统组成。激光器为波长可调谐的ArF

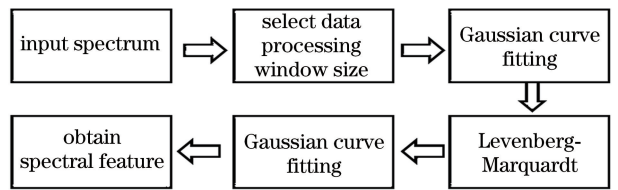


图1 高斯非线性拟合寻峰算法流程

Fig. 1 Flow chart of Gaussian nonlinear curve fitting peak-detection algorithm

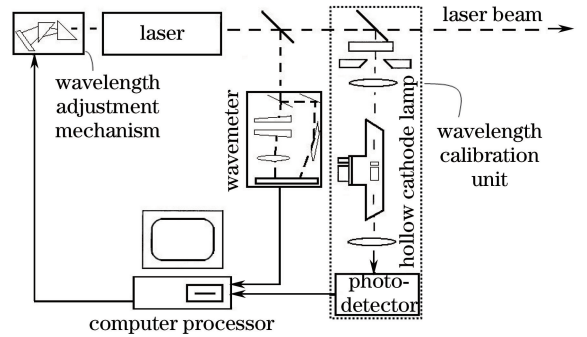


图2 绝对波长校准实验装置图

Fig. 2 Diagram of absolute wavelength calibration experiment setup

准分子激光器,谱线宽小于0.3 pm,最高输出频率为4 kHz,脉冲能量为1 mJ。波长计由法布里-珀罗(F-P)标准具和中阶梯光栅结合在线测量激光器中心波长。校准单元主要由空心阴极灯和光强探测器组成,空心阴极灯采用铂(Pt)作为吸收波长元素,其在193 nm附近存在两条强吸收线(193.22433 nm和193.43690 nm),可作为参考波长^[17]。校准过程:首先通过波长调谐装置扫描激光波长,同时保持激光输出光强不变,波长扫描的范围应接近强吸收波长,实验中使用193.43690 nm作为参考波长,波长扫描范围为193.4322~193.4371 nm,扫描步长为0.05 pm。从激光腔体内输出线宽极窄的激光光束,经分光透镜后分别进入波长计和波长校准单元。进入波长计的激光光束由中阶梯光栅粗测波长和F-P标准具精测波长,并将测量结果传入计算处理器综合得出中心波长,该波长为测量波长;进入波长校准单元的光束经散射镜、孔径光阑、聚焦透镜聚焦到阴极管腔内中心处,再由另一块聚焦透镜将透过光束聚焦到光探测器上,探测器将探测的激光光强结果传入计算处理器。通过两者可得到元素吸收谱。

如图3所示为激光输出频率为1000 Hz时所获得的Pt吸收谱线图,横坐标为波长计实测波长,纵坐标为激光束穿过空心阴极灯前后光强 E_1 与 E_2 的比值 K 。校准的核心环节是通过算法设计确定元素吸收谱中心波长位置,最后由元素吸收实际波

长 193.43690 nm 校准波长计的测量波长。

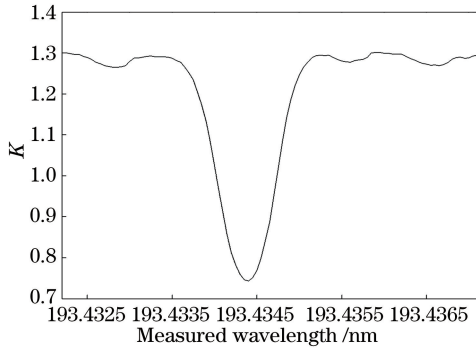


图 3 1000 Hz 频率下校准单元所测 Pt 吸收谱线
Fig. 3 Pt absorption line measured in 1000 Hz by the calibration unit

4 5 种寻峰算法比较及优化

4.1 5 种寻峰算法仿真和实验比较

在仿真研究中,选用高斯切趾函数模拟元素吸收谱信号,选用高斯噪声模拟信号噪声,仿真环境中

噪声大小占信号的 5%。使用 Matlab 仿真上述元素吸收谱信号,输出 30 组数据,并使用 5 种寻峰算法进行处理。仿真结果如表 1 所示。其中,高斯非线性曲线拟合寻峰算法的误差在 5 种寻峰算法中最小,仅为 ± 0.05 pm。在同等环境下,质心探测寻峰算法、一般多项式拟合寻峰算法、高斯拟合寻峰算法、高斯-多项式拟合寻峰算法的误差分别为 ± 0.65 , ± 0.30 , ± 0.14 , ± 0.08 pm。

由实验平台采集 30 组 Pt 元素吸收光谱数据,分别用 5 种寻峰算法进行处理。首先截取最大幅值的 5% 以上信号作为有效信号,以消除低幅值的不规则波形对拟合算法的影响。结果如表 1 所示,质心探测寻峰算法的平均误差为 ± 0.70 pm,一般多项式拟合寻峰法的平均误差为 ± 0.40 pm,高斯-多项式拟合寻峰法的平均误差为 ± 0.24 pm,高斯拟合寻峰法的平均误差为 ± 0.30 pm,高斯非线性曲线拟合寻峰法的平均误差最小,为 ± 0.15 pm。

表 1 各寻峰算法仿真及实验误差

Table 1 Simulations and experimental errors of each peak-detection algorithm pm

Item	Centroid detection	Polynomial fitting	Gaussian-polynomial fitting	Gaussian fitting	Gaussian nonlinear-fitting
Simulation error	0.65	0.30	0.08	0.14	0.05
Experimental error	0.70	0.40	0.24	0.30	0.15

仿真分析结果与实验测试结果具有较强的一致性,在 5 种寻峰算法中,高斯非线性曲线拟合寻峰法仿真及实验误差均最小。因此,高斯非线性曲线拟合寻峰法更接近绝对波长校准精度要求。

由表 1 可知,仿真误差结果明显低于实验误差。其主要原因是:仿真信号采用标准高斯切趾函数作为信号源,噪声类型为标准高斯噪声,而实验系统信号由于受实验环境、光学器件等影响,并非标准函数类型,而且在实验环境中噪声源众多,吸收谱受多种混合噪声的叠加影响,因此实验误差大于仿真误差。同时也可以看出,同一算法下仿真与实验结果误差相差较小,且趋势一致,说明仿真条件的设置与实际情况较符,证明实验吸收谱曲线十分接近高斯切趾函数,而噪声则以高斯噪声为主。

4.2 强度阈值分析

由仿真与实验算法比较可知,直接使用各种寻峰算法都无法满足绝对波长校准的精度要求,因此须对算法作进一步优化。一般地,强度阈值设置对寻峰算法影响较大。绝对波长校准的关键是确定吸收谱曲线的峰值位置,设置适当的强度阈值可更准确地提取光谱中心波长信息,降低低于强度阈值信

号的干扰,同时在某种程度上可减少冗余数据,提高算法运行效率。

实验首先通过 Matlab 计算 5 组吸收谱光强度的平均值(记作 avg,作为基本单位),其次通过设置平均强度值的不同倍数作为各算法的强度阈值,其中 0 表示不设置强度阈值,1 表示将该平均值设置为各算法强度阈值,2 表示将该平均强度阈值的 2 倍数值设置为各算法强度阈值,以此类推。最后使用设置强度阈值后的各寻峰算法计算实验所得的 5 组吸收谱中心波长误差。图 4 所示为 5 种寻峰算法在不同强度阈值情况下对中心波长误差的影响情况。

实验结果表明,阈值选取对 5 种算法寻峰结果的影响很大,且存在最佳强度阈值使得误差最小。在不设置强度阈值(即强度阈值倍数为 0)的情况下,质心探测寻峰算法的平均误差为 0.75 pm,一般多项式拟合寻峰算法的平均误差为 0.4 pm,高斯-多项式拟合寻峰算法的平均误差为 0.25 pm,高斯拟合寻峰算法的平均误差为 0.3 pm,高斯非线性曲线拟合寻峰算法的平均误差为 0.14 pm。由图 4(a)可知,寻峰算法的误差首先随着强度阈值的增大而减小,当强度阈值为 3 时,其误差降至最小,随后又随

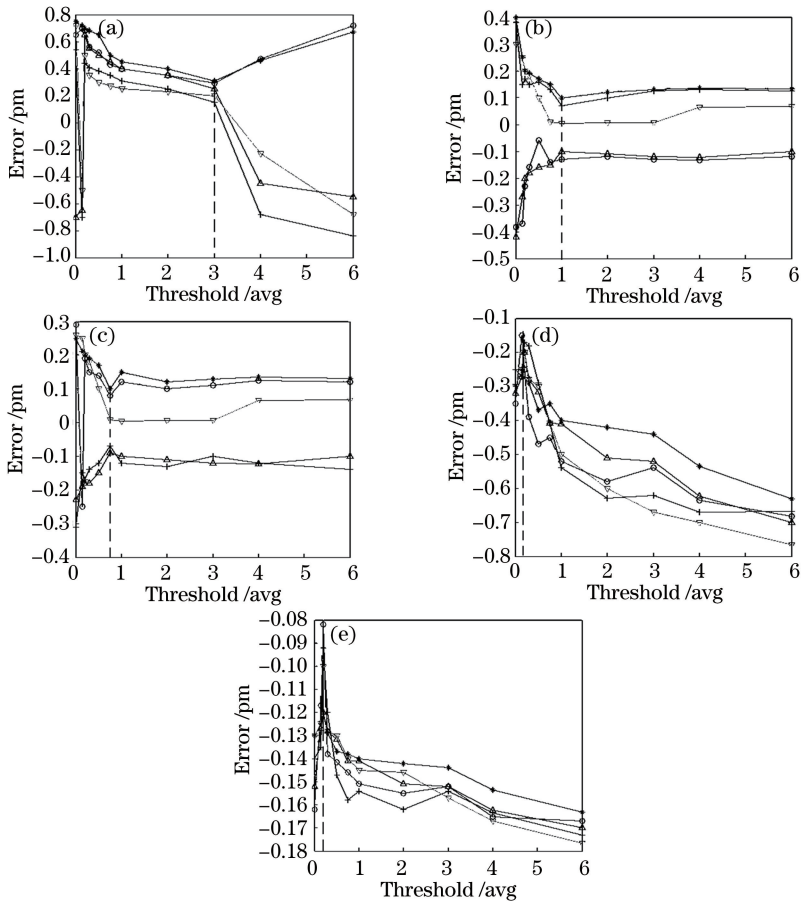


图 4 强度阈值对各寻峰算法误差的影响。(a)质心探测寻峰法;(b)一般多项式拟合;
(c)高斯-多项式拟合;(d)高斯拟合;(e)高斯非线性曲线拟合法

Fig. 4 Influence of power threshold upon error of different algorithms. (a) Centroid detection algorithm;
(b) polynomial fitting; (c) Gaussian-polynomial fitting; (d) Gaussian fitting; (e) Gaussian nonlinear curve fitting

阈值增大而增大。其主要原因是:开始在强度阈值增大过程中,由于消除了部分噪声,误差下降,而后随着强度阈值增加误差增大,则是受实验统计数据量减小所致。图 4(b)、(c)具有相似的变化趋势:首先,误差随着强度阈值的增加而减小;随后,误差基本保持在一定范围内,不随阈值的变化而变化。一般多项式拟合寻峰算法和高斯-多项式拟合寻峰算法具有这种变化趋势的主要原因是:当设置的起始强度阈值比较小时,这两种寻峰算法提取的元素吸收谱线型严重偏离二次型,随着强度阈值的增加,其拟合函数越来越接近标准二次谱线型,故误差减小,再随着强度阈值的增加,对误差的影响基本保持不变。图 4(d)、(e)显示,高斯拟合寻峰算法和高斯非线性曲线拟合法寻峰误差随强度阈值的变化情况具有类似的变化趋势,均在平均强度阈值的 0.2 倍处算法误差最小,随后误差随强度阈值的增加而增大。

主要原因是:由于阈值设置有效抑制了噪声,当强度阈值较小时,误差随阈值增大而减小,而后由于这两种寻峰算法提取的元素吸收谱线型偏离标准高斯谱线型,故而误差随强度阈值的增加而逐渐增大。

通过以上分析知,可通过设置最佳强度阈值来优化各算法,使得各算法误差最小。各寻峰算法的最佳强度阈值可由实验平均误差最小值而得,利用各算法最佳强度阈值优化算法。表 2 所示为 5 种寻峰算法的最小算法误差及对应的最佳强度阈值。

通过设置最佳阈值,所有算法的误差都大幅降低,其中高斯非线性曲线拟合寻峰算法下的绝对波长校准最小误差降低至 0.04 pm,但其重复性及稳定性还有待提升,平均误差为 0.06 pm。至此可得,光刻用准分子激光绝对波长校准参考中心波长位置可采用设置最佳强度阈值的高斯非线性曲线拟合寻峰法判定,且能基本满足 0.05 pm 的校准精度要求。

表 2 各寻峰算法最小误差及对应的最佳强度阈值

Table 2 Minimum error and optimum intensity threshold of each peak-detection algorithm

Item	Centroid detection	Polynomial fitting	Gaussian- polynomial fitting	Gaussian fitting	Gaussian nonlinear-fitting
Power threshold / avg	3	1	0.8	0.2	0.2
Minimum error / pm	0.2	0.1	0.08	0.13	0.04

5 影响寻峰算法的误差原因分析

在寻峰算法中,噪声类型、元素吸收谱线型以及噪声大小是影响寻峰算法误差的主要原因。由仿真结果分析可知,元素吸收谱的噪声类型以高斯噪声为主,而高斯非线性曲线拟合寻峰算法能较好地抑制该类噪声,实验也证明该寻峰算法抗干扰能力最强。元素吸收谱线型对设置最佳强度阈值后的高斯非线性曲线拟合寻峰算法的影响相当有限,实验通过对高斯切趾函数、布拉克曼切趾函数以及柯西切趾函数设置不同参数模拟元素吸收谱,利用高斯非线性曲线拟合寻峰,结果表明,谱线型对寻峰算法误差影响很弱。因此在以高斯非线性曲线拟合寻峰法作为绝对波长校准寻峰算法时,相对于噪声大小(或信噪比),噪声类型和元素吸收谱线型对寻峰算法误差的影响可忽略,噪声大小是影响寻峰算法误差的主要因素。

实验通过仿真不同的信噪比,使用高斯非线性曲线拟合寻峰来研究噪声大小对寻峰误差的影响。结果显示,算法误差随着噪声的增大呈线性增大。信噪比(噪声幅度/信号幅度)为 0.1% 时,算法误差为 0.005 pm;信噪比为 1% 时,算法误差为 0.05 pm;信噪比为 10% 时,算法误差为 0.5 pm。如图 5 所示为高斯非线性曲线拟合寻峰算法误差与信噪比的关系,误差随着噪声的增大而增大。

通过以上分析可得,信噪比是影响寻峰算法的主要因素,为进一步提升算法精度、降低算法误差,须从抑制噪声角度着力。针对准分子激光绝对波长校准,主要应从激光能量稳定性、元素灯吸收稳定性等方面抑制噪声。

6 结 论

通过对绝对波长校准中元素吸收谱线的仿真及实验,比较分析了 5 种寻峰算法,其中,高斯非线性曲线拟合寻峰法的误差最小,仿真平均误差为 0.05 pm,实验平均误差为 0.15 pm。为进一步减小算法误差,分析了强度阈值对寻峰算法误差的影响。结果显示,强度阈值对寻峰算法影响显著,实验表

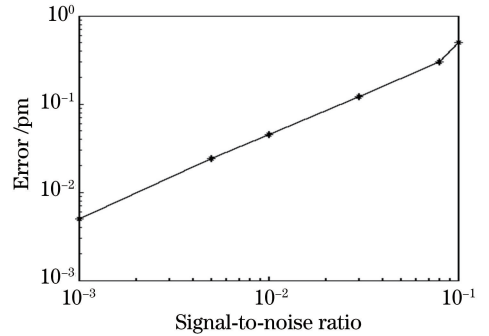


图 5 高斯公式非线性曲线拟合寻峰法的信噪比和误差关系曲线

Fig. 5 Relationship of signal to noise ratio and error in Gaussian nonlinear curve fitting peak-detection algorithm

明,各算法均存在最佳强度阈值使得误差最小。通过设置最佳强度阈值优化算法,高斯非线性曲线拟合寻峰算法的最小误差可降至 0.04 pm,实验平均误差可降至 0.06 pm,基本满足准分子激光绝对波长校准的精度要求,应选其作为绝对波长校准的核心算法。

在影响算法误差的原因分析中,影响高斯非线性曲线拟合寻峰算法误差的主要因素为噪声大小,噪声类型及吸收谱线型对其影响十分有限。下一步须从抑制噪声角度出发,提高绝对波长校准精度,特别是在激光能量稳定性、元素灯吸收稳定性等方面。

参 考 文 献

- [1] Basting D, Marowsky G. Excimer laser technology [M]. Berlin: Springer, 2005: 89-98.
- [2] Das P P, Sandstrom R L, Fomenkov I. Wavelength reference for excimer laser: US5,978,391[P]. 1999-11-02.
- [3] Newman P C, Sandstrom R L. Wavelength system for an excimer laser: US5,978,394[P]. 1999-11-02.
- [4] Nave G, Sansonetti C J. Reference wavelengths in the spectra of Fe, Ge, and Pt in the region near 1935 Å[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(2): 442-453.
- [5] Fomenkov I. Method and apparatus for calibrating a laser wavelength control mechanism: US5,450,207 [P]. 1995-09-12.
- [6] Zhu M, Zhang M, Hu L Z, et al. Peak-search

- algorithm for center wavelength detection in fiber Bragg grating[J]. Study on Optical Communications, 2011, 37(5): 60-63.
朱梅, 张森, 胡立章, 等. 光纤布拉格光栅中心波长检测中的寻峰算法[J]. 光通信研究, 2011, 37(5): 60-63.
- [7] Othonos A, Kalli K. Fiber Bragg gratings: fundamentals and application in telecommunications and sensing[M]. Boston: Artech House Publishers, 1999.
- [8] Jing W C, Wang G H, Liu K, *et al.* Application of weight wavelength algorithm on the demodulation of a fiber Bragg grating optical sensing system [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(9): 1022-1025.
井文才, 王光辉, 刘琨, 等. 功率加权法用于光纤 Bragg 光栅特征波长检测 [J]. 光电子 • 激光, 2007, 18(9): 1022-1025.
- [9] Steven C C. Applied numerical methods with MATLAB for engineer and scientists [M]. New York: McGraw-Hill, 2009: 333-348.
- [10] Chen Z J, Bai J, Wu Z T, *et al.* Optimization and comparison of the peak-detection algorithms for the reflection spectrum of fiber Bragg grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(11): 1112001.
陈志军, 白剑, 吴祖堂, 等. 光纤布拉格光栅反射谱寻峰算法优化及比较[J]. 光子学报, 2015, 44(11): 1112001.
- [11] Wu B, Liu Y Z, Zhang Q S, *et al.* High efficient narrow linewidth fiber laser based on fiber grating Fabry-Perot cavity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(3): 350-353.
武波, 刘永智, 张谦述, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔的高效窄线宽光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 350-353.
- [12] Lee H W, Park H J, Lee J H, *et al.* Accuracy improvement in peak positioning of spectrally distorted fiber Bragg grating sensors by Gaussian curve fitting [J]. Applied Optics, 2007, 46(12): 2205-2208.
- [13] Wang F M, He Z H, Suo J. Application of numerical calculation method [M]. Beijing: Science Press, 1992.
王福明, 贺正辉, 索瑾. 应用数值计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [14] Zhu H H, Qin H K, Zhang M, *et al.* Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 893-897.
朱浩瀚, 秦海琨, 张敏, 等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 893-897.
- [15] Su J, Dong X P, Shi Z D. Design of the sensitivity enhanced strain sensor based on fine transmission spectrum of FBG [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0805002.
苏娟, 董小鹏, 石志东. 基于 FBG 精细谱的应变增敏型传感器的设计 [J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805002.
- [16] Wang Q N, Yang Y H. A FBG spectrum peak detection technique based on Steger image algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0810004.
王巧妮, 杨远洪. 基于 Steger 图像算法的光纤布拉格光栅寻峰技术 [J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0810004.
- [17] Lokai P, Schroeder T, Kleinschmidt J, *et al.* Absolute wavelength calibration of lithography laser using multiple element or tandem see through hollow cathode lamp: US7,006,541[P]. 2006-02-28