

文章编号: 1005-5630(2023)05-0011-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.005.002

基于卡尔曼滤波算法的光谱共焦测量精度的提升方法

赵斌, 毛肖肖, 田申诚, 曹焱, 董祥美, 高秀敏
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为减少待测物体位置变化时光谱系统受到的噪声干扰以及峰值定位误差, 基于卡尔曼滤波算法原理, 提出一种将 Voigt 寻峰定位的结果作为观测误差并进行最优估计来提升共焦系统测量精度的方法。先进行标定实验, 确定光谱共焦系统的测量范围及精度; 再依次对比中值滤波、Savitzky-Golay 滤波以及快速傅里叶变换滤波等对光谱信号去噪的处理情况, 并选用高斯、洛伦兹以及 Voigt 拟合等方法寻峰定位。同时, 分析了 Voigt 拟合中的峰值提取、高斯宽度、洛伦兹宽度以及幅值误差对拟合精度的影响。实验结果表明, 系统的测量范围可达 3 mm, 中心光斑半径增大了近 1.79 倍, 采用卡尔曼滤波算法能够降低系统中的噪声引起的定位误差且系统精度能够提升 11 倍, 满足高精度的测量需求。

关键词: 光谱共聚焦系统; 卡尔曼滤波; Voigt 拟合; 误差函数
中图分类号: O 433.1 **文献标志码:** A

Method to improve the accuracy of spectral confocal measurement based on Kalman filtering algorithm

ZHAO Bin, MAO Xiaoxiao, TIAN Shencheng, CAO Yan, DONG Xiangmei, GAO Xiumin
(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To reduce the noise interference and peak positioning error of the spectral system when the position of the object to be measured changes, based on the principle of Kalman filtering algorithm, a method is proposed to improve the measurement accuracy of the confocal system by taking the results of Voigt peak-finding and positioning as the observation error and making the optimal estimation. In this work, calibration experiments are carried out to determine the measurement range and accuracy of the spectral confocal system. Then, the denoising processing of spectral signals such as median filtering, Savitzky-Golay filtering, and fast Fourier transform filtering is compared in turn, and Gaussian, Lorentz, and Voigt fitting methods are used to find peaks. At the same time, the effects of peak extraction, Gaussian width, Lorentz width, and

收稿日期: 2022-12-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1313803)

第一作者: 赵斌 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光学传感测量。E-mail: zh9426246@163.com

通信作者: 高秀敏 (1978—), 男, 研究员, 研究方向为智能传感、光学精密测量。E-mail: gxm@usst.edu.cn

amplitude error on fitting accuracy in Voigt fitting are analyzed. The experimental results show that the measurement range of the system can reach 3 mm, and the radius of the central spot changes by nearly 1.79 times. The Kalman filtering algorithm can reduce the positioning error caused by noise in the system, and the system accuracy can be improved by 11 times to meet the requirements of high-precision measurement.

Keywords: spectral confocal system; Kalman filtering; Voigt fitting; error function

引 言

光学无损测量是工业上首选, 位移检测技术作为几何参量精密测量的基础逐步趋于实时、无损方向发展^[1]。随着工业加工工艺的快速发展, 对精密测量技术有了更高的要求, 常用的光学检测方法有激光三角法^[2]、双目视觉法^[3]、白光干涉法^[4]、激光共焦法^[5]、分布式光纤法^[6]以及光谱共焦法(chromatic confocal measure)^[7]。共焦测量作为高精度的位移测量方法, 与被测表面之间形成良好的轴向响应, 与目前其他常用的光学测量方法相比, 测量光路采用共轭结构, 对周围杂散光具有很好的抑制作用。

1957年, Minsky^[8]首次提出共焦显微镜的思想。Molesini等^[9]搭建了第一台表面轮廓仪。随后众多国内外研究人员对共焦系统作了深入研究^[10-11]。因其高精度、易于集成的优势, 共焦系统在测量前无需对测量样品进行处理就可以实现快速非接触式在机测量, 它的测量精度可以达到亚微米级别^[12], 在工业精密加工^[13]、生物组织病变检测^[14]、核工业环境下的器件检测^[15]以及薄膜厚度测量^[16-17]等领域都出现了它的身影。共聚焦显微镜的轴向分辨率不仅取决于光学特性, 而且还取决于所选用的峰值提取算法, 准确可靠的峰值提取起着至关重要的作用。然而, 现有的峰值提取算法易受随机噪声的影响, 降低了最终的测量精度。对此, 李春艳等^[18]提出基于广义回归神经网络(GRNN)拟合算法能够有效地抑制波长提取引起的波动, 从而提高系统测量的分辨率与稳定性。Rahlves等^[19]讨论了各种噪声源对共聚焦强度信号评估算法的影响, 利用高斯误差传播规律分析测量系统的不确定度。Li等^[20]利用自适应模态分解方法提取峰值信息, 该算法能够有效地提取出重叠的峰值, 精度提高

约40%。Chen等^[21]考虑了各种噪声源对共聚焦强度信号评估算法的影响, 提出表面高度(SHD)的评估模型, 峰值提取精度比现有算法有显著提高。Luo等^[22]提出修正的拟合微分算法(CFDA)来准确、高效地提取峰值, 计算效率提高约100倍。

然而, 对光谱信号中存在的噪声, 需要选用合适的滤波方法进行处理后再进行寻峰定位, 定位结果对滤波数据有很强的依赖性, 滤波结果的准确性影响了共焦系统最终测量精度。因此, 为进一步提高光谱共聚焦测量结果的可靠性, 本文采用卡尔曼滤波算法来降低寻峰定位结果误差, 利用状态方程的递推性, 采用递推算法对寻峰结果误差进行最佳估计, 能够有效提升共焦系统位移测量的准确性。

1 测量原理

根据光线传播的色散特性可知, 复色光束经过透明材料后, 由于玻璃材料对各单色光的折射角不同而发生分离, 这导致不同波长的光束会聚在光轴上不同位置处^[23]。其测量原理如图1所示, 位移量与焦距值之间的编码是光谱共焦位移测量系统实现的关键^[9]。

基于共焦检测的高分辨率优势, 整个系统由电流控制开关装置、白光LED光源、可调光阑、平凸透镜、准直透镜、分光棱镜、色散透镜、步进电机、三维位移台、光谱仪以及彩色相机等组成。通过电源驱动开关控制白光LED光源向待测表面发射复色光, 经过光阑滤除周围杂散光后, 在平凸透镜的焦点处会聚成为一个点光源, 经准直整形成为一束平行光, 色散物镜将沿着轴向传输的平行光进行色散, 照射在待测表面上, 光谱仪接收来自表面焦点处反射的单体

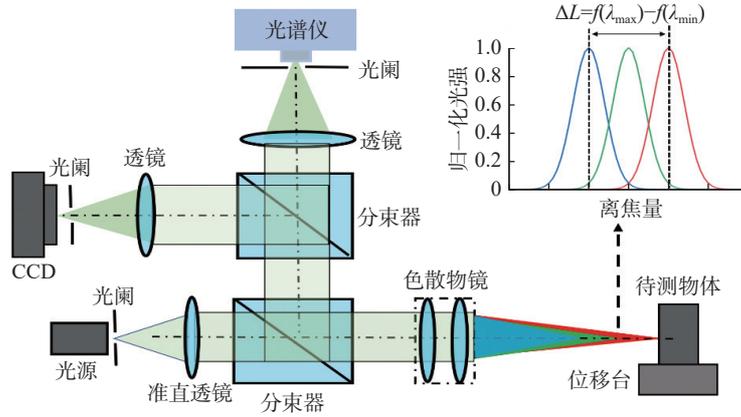


图1 共焦测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the confocal measurement system

光波长。在共焦系统中, 由于光波的选择特性, 经过色散镜头后的出射信号在光谱采集系统上可以获得其光谱分布, 它的测量精度与光谱分辨能力密切相关。

通过建立光波色散与轴向位置之间的对应线性关系, 在系统测量范围内, 采集待测位置的共焦波长, 并记录变化的光谱峰值波长, 进而得到物体的位移数值。根据共焦理论, 其轴向分辨能力与接收的光强有关, 在理想情况下, 轴向离焦量与共焦光强响应之间存在如下关系^[13]

$$I(u) = \left[\frac{\pi a^2}{\lambda f} \operatorname{sinc}\left(\frac{u}{4}\right) \right]^4 \quad (1)$$

式中: a 是孔径; f 是焦距; λ 是波长; u 是归一化光瞳坐标,

$$u = \frac{2\pi a^2 \delta z}{\lambda f} \quad (2)$$

各单色光波长 λ_i 与焦距 $f(\lambda_i)$ 之间的线性关系, 则可以表示为^[13]

$$f(\lambda_i) = z + k\lambda_i \quad (3)$$

它的测量范围可以用下式表示

$$\Delta L = f(\lambda_{\max}) - f(\lambda_{\min}) \quad (4)$$

式(4)建立了光波长和位移之间的对应关系, 而线性度和分辨率是衡量测量精度的重要指标。根据光的衍射传播特性, 当被测物体放置于传感器的共焦位置处, 采用逐点扫描的方法, 此时经过孔径光阑后在探测器上获得轴向峰值光强, 峰值光强会随着离焦量的变化而变化。根据

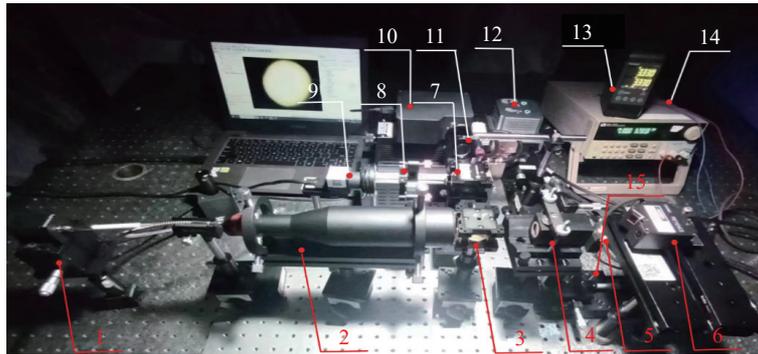
瑞利准则, 轴向光强响应的光谱带宽的半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 作为系统分辨力的评价指标^[13]。

2 实验结果及分析

2.1 标定实验

光谱共焦传感系统标定实验需要校正标定曲线用于实际测量, 标定实验装置如图2所示。实验中通过数字稳压直流电源给显示器供给 CMOS 激光三角位移传感器 (LK-H050 基恩士) 实时反馈步进电机的实际位移。标定过程目的是确定峰值波长与位移对应关系。校准范围为 3 mm, 采用薄垫片 (GCM-030142M Daheng, $\varphi=4.5$, $h=1$ mm, 大恒) 通过三维电机驱动 (GCD-040101M) 步进位移台以单次 100 μm 的等距沿着轴向位移, 共移动 30 个位置, 在每个位置重复测量 20 次, 记录光谱仪 (SpectraNexus, Nahon 工作波段 280~980 nm, 分辨精度为 0.02 nm) 采集的光谱信号。该信号一般呈现单峰强度响应特征, 每个位置的数据取 20 次的均值结果作为最终位移。

白光光源的工作波长为 400~750 nm, 准直镜头选用 (BE 20-1064, Thorlabs), 平凸透镜的焦距为 75 mm, 选用彩色相机 (DFK 33UJ003) 采集标定实验中各个位置处的光斑与位移的变化情况。当待测物体通过驱动步进位移台沿轴向位置向共焦测量系统移动时, 其波长也随着物体位置而改变, 光斑的变化情况如图3所示。



1—白光光源, 2—准直器件, 3—分束器 1, 4—色散物镜, 5—待测垫片, 6—激光三角位移传感器, 7—分束器 2, 8—平凸透镜 1, 9—彩色相机, 10—光谱仪, 11—平凸透镜 2, 12—电机控制器, 13—数值显示器, 14—数字直流电源, 15—步进位移台。

图 2 校准实验平台装置

Fig. 2 Experimental platform for the calibration

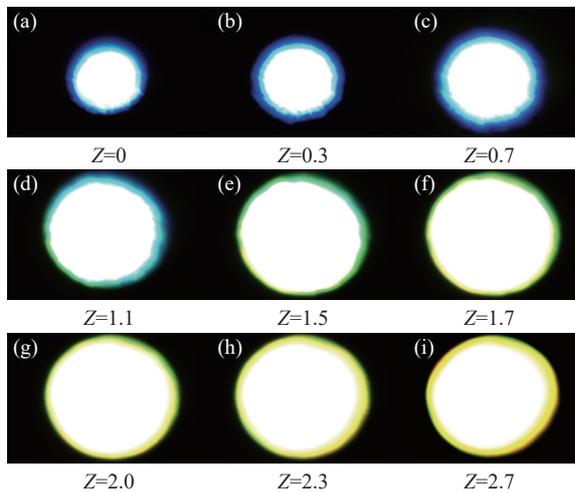


图 3 各个测量位置的光斑变化彩图

Fig. 3 Image of spot change at each measurement location

由于反射式共焦系统的共轭特性, 其位置与波长之间的变化规律满足色散与位置的对应关系。电机驱动的固定单步移动步长为 0.1 mm, 速度为 2.94 mm/s, 步进精度为 0.0025 mm。当待测物体经过电机驱动位移台移动 3 mm 位置时, 记录每个位置处的彩色光斑图像。光斑半径由最初的 0.4 mm 增至 0.8 mm, 除了中心白光的环半径在逐渐变大以外, 其颜色也随之发生改变, 由蓝色逐渐变为绿色、黄色、红色, 在整个运动步长上的光斑半径变化约为 1.79 倍。

2.2 峰值拟合准确性

光谱采集系统所获取的光谱数据中还富含噪声(黑色线条), 如图 4(a)所示, 为了获取准确

的光谱测量结果, 将光谱仪上每个位置处采集的 20 个均匀的离散数据点进行滤波处理。选用中值滤波(绿色线条)、Savitzky-Golay(S-G)滤波(红色线条)以及快速傅里叶变换(FFT)滤波(蓝色线条)分别进行信号处理, 对比三种常用的滤波方法的效果, 如图 4(a)所示。通过对原始光谱数据的处理, 中值滤波能够有效提升滤波效果, 噪声相对于其他两种方法会有降低。因此, 选用中值滤波算法作为本实验的光谱数据去噪方法。同时, 经过滤波后的光谱数据选用高斯拟合、洛伦兹拟合以及 Voigt 拟合等三种常用高精度拟合算法进行寻峰定位, 选取四个位置进行三种寻峰比对, 结果如表 1 所示。

由于采集系统的硬件以及反射回采集光路中的光强损耗等因素都会对谱峰定位引入误差, 需要对采集的信号进行预处理后再用适当的算法提取峰值波长。选用高精度的拟合方法来实现谱峰定位, 表 1 对三种寻峰算法进行了详细比较, 在相同时间内, 拟合精度最高的是 Voigt 拟合方法, 线性回归系数 R^2 超过了其他两种方法。其次, 洛伦兹拟合的迭代次数最少, 拟合精度也是三种算法中最低的, 高斯拟合的精度及迭代次数较为适中。针对高精度的寻峰定位, 首选 Voigt 拟合方法, 它的迭代次数以及精度更高。同时, 存在一个最优的测量间隔, 从中也可以提取出线性度较好的校准曲线, 对每个位置采用 Voigt 拟合方法, 7 个线性位置(0.7 mm)拟合的峰值曲线如图 4(b)所示。处理光谱数据的最终目的是获

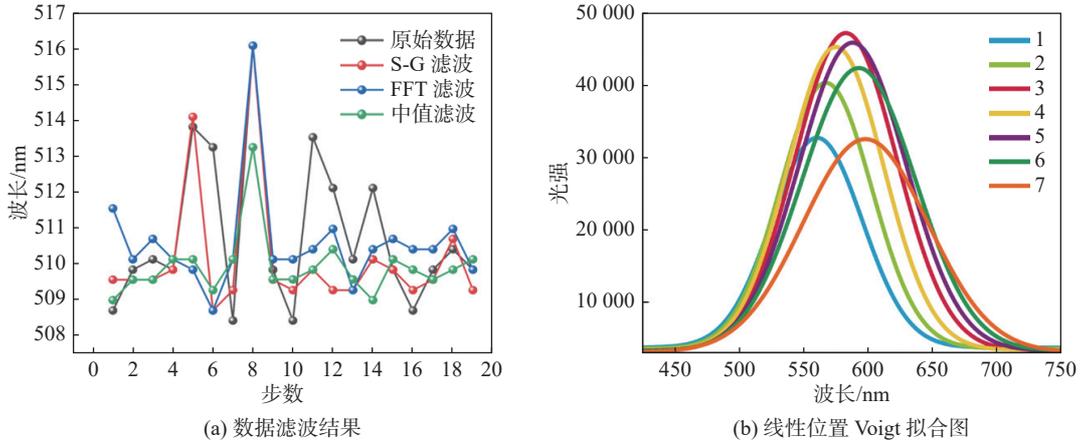


图 4 标定实验数据处理

Fig. 4 Data processing for calibration experiments

表 1 三种拟合方法对比
Tab. 1 Comparison of the three fitting methods

拟合方法	位置	迭代次数	中心峰值/nm	拟合 R^2
Gaussian	4	24	525.00	0.983 84
	8	18	561.50	0.992 86
	12	15	574.45	0.991 94
	16	16	579.28	0.990 93
	20	7	583.86	0.983 49
Lorentz	4	14	528.74	0.987 44
	8	15	562.11	0.979 93
	12	17	574.73	0.985 76
	16	23	579.47	0.987 26
	20	6	584.17	0.986 30
Voigt	4	20	525.00	0.990 82
	8	27	562.12	0.994 51
	12	46	574.32	0.993 64
	16	35	580.55	0.992 84
	20	12	584.17	0.989 23

取更高精度的拟合结果, 需要深入研究各个输入参数对拟合精度的影响。Voigt 函数是高斯与洛伦兹函数的卷积, 拟合函数如下:

$$V(\lambda) = (f_1 * f_2)(\lambda) = C \frac{2 \ln 2}{\pi^{\frac{3}{2}}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-t^2}}{\left(\sqrt{\ln 2} \frac{W_1}{W_g}\right)^2 + \left(\sqrt{4 \ln 2} \frac{\lambda - \lambda_0}{W_g} - t\right)^2} dt \quad (5)$$

式中: $f_1(\lambda) = \frac{2A}{\pi} \frac{W_1}{4(\lambda - \lambda_0)^2 + W_1^2}$; $f_2(\lambda) = \sqrt{\frac{4 \ln 2}{\pi}} \frac{e^{-\frac{4 \ln 2}{W_g^2} \lambda^2}}{W_g}$; C 是一个常数; W_1 和 W_g 分别是洛伦兹宽度和高斯宽度; λ 和 λ_0 分别是探测光谱波长和峰值中心波长。对 Voigt 拟合方法各个量进行误差拟合, 误差曲线如图 5 所示。

利用观测点数据的残差加权平方 χ^2 来判定拟合效果, 从图 5 拟合曲线可以看出四个参数的拟合效果有显著的提升, 图 5(a) 中中心峰值的拟合仍存在微小的拟合误差, 图 5(b)~(d) 中拟合效果都达到最佳, 但通过上述精确的校准实验仍然存在测量误差。因此, 需要选用更加适合的方法来进一步提升测量精度。

2.3 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波(Kalman filtering)方法^[24]在信号处理领域应用广泛, 利用状态方程的递推性, 按线性无偏最小均方误差估计准则, 采用递推算法对观测结果误差进行最佳估计, 实现位移的准确测量。由于估计值和测量值之间都存在不确定性, 为了使预测误差不确定性达到最小, 选择一种合适的方法有利于提高共焦测量的精度, 此外, 基于波长和位移之间的线性关系光谱噪声还满足高斯分布。基于最优估计的滤波算法, 将前一时刻的预测结果和此次的测量之间的加权平均结果进行对比, 调节增益实现准确的估计值迭代, 以此来达到最优筛选。因此当前时刻的状态估计可以表示为

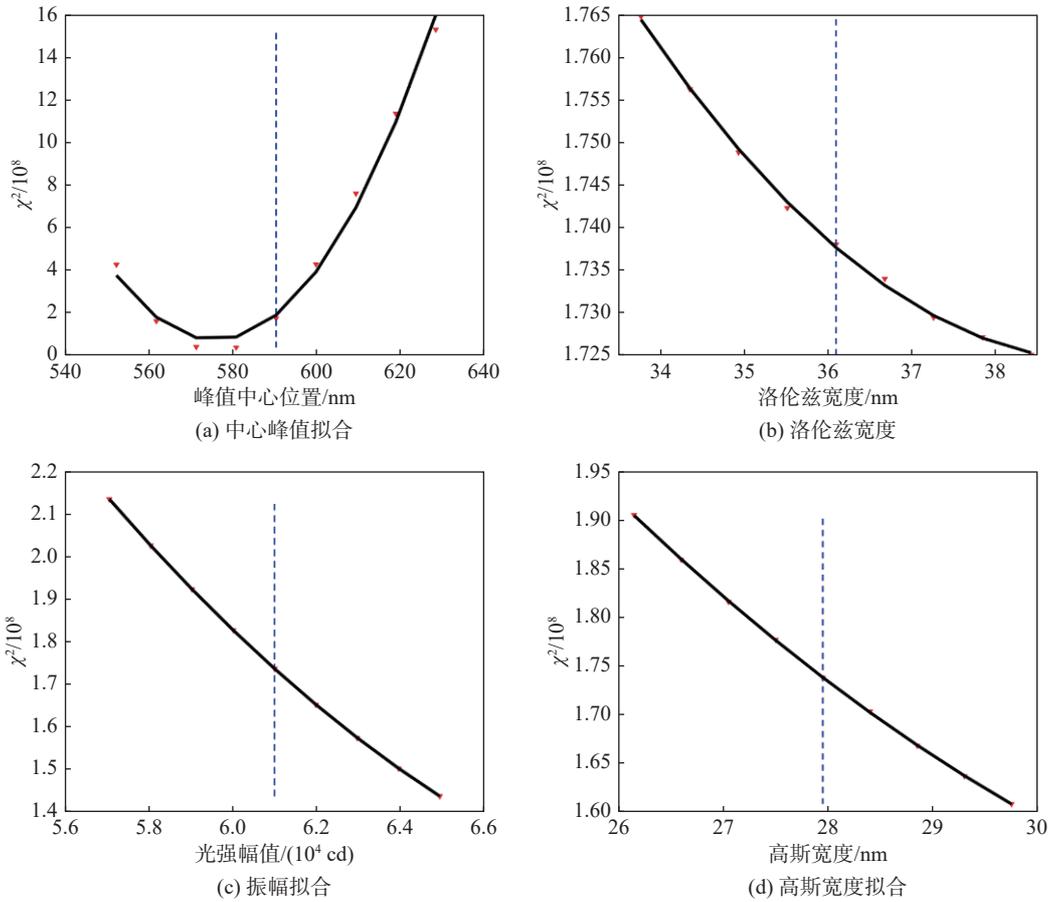


图 5 Voigt 拟合中 4 个重要的误差拟合参数分析

Fig. 5 Analysis of four important error fitting parameters in Voigt fitting

$$\hat{X}_k = A\hat{X}_{k-1} + Bu_{k-1} + W \quad (6)$$

$$P_k = (I - K_k H)\bar{P}_k \quad (10)$$

式中： W 是估计噪声，服从高斯分布； Q 是 W 的方差； A 是状态转移矩阵； B 是控制矩阵。因此，先验估计状态的不确定性可以表示为

$$\bar{P}_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (7)$$

为了让先验估计和测量的方差在所有的增益 K_k 取值达到最小，通过这个参数决定更相信估计值还是测量值。

$$K_k = \frac{\bar{P}_k H}{H\bar{P}_k H^T + R} \quad (8)$$

式中： R 为测量噪声 V 的方差，而传感器测量误差是一个固定的数据； H 是观测矩阵。通过式 (8)可得最优状态估计值为

$$X_k = \hat{X}_k + K_k(Z_k - H\hat{X}_k) \quad (9)$$

Z_k 是观测向量，最优状态估计值的协方差矩阵可以表示为

通过式(6)~(10)可知，在预测的同时，本身就引入了新的噪声，基于上一个位置 k 点做预测，必然会引入不确定性误差，融合先验状态估计值 X_k 和测量值 Z_k ，使最终的结果中包含噪声成分最少，从而求出增益 K_k 。将此次输出协方差矩阵值(不确定性)作为下一次估计值协方差矩阵输入更新，如此一来，不断迭代达到最佳预估结果。本文实验采用了高精度 CMOS 激光三角位移传感器(LTD)，它的测量误差为 $0.025 \mu\text{m}$ ，电机步进位移台定位精度为 $10 \mu\text{m}$ ，光谱共焦测量结果曲线如图 6(a)所示，在 30 个位置的测量结果基本满足线性关系。

卡尔曼滤波方法需要将 Voigt 拟合寻峰定位后的位移值作为观测值进行迭代。从图 6(b)可以看出，在初始位置的效果并不是很明显，误差为 0.12 mm ，三角法与共焦法的测量误差为

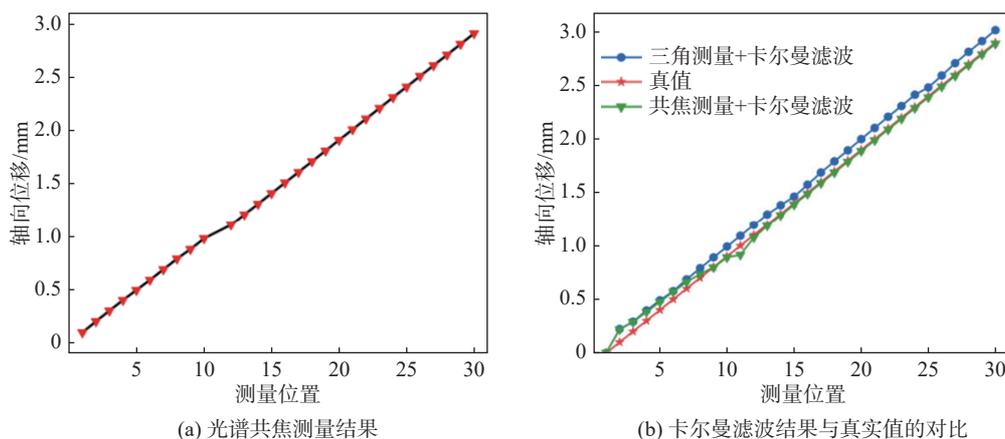


图6 实验测量结果对比

Fig. 6 Comparison of experimental measurements

12.67%，共焦法经多次迭代后与真值的定位误差仅为 0.0107 mm，平均误差为 2.84 μm ，而真值的结果与步进电机移动位置有关，它的定位精度同样也为 10 μm 。因此，共焦测量结果与步进位移台移动的定位误差相符，经过卡尔曼滤波后定位精度提升了 1.071%，相较于仅仅利用中值滤波与 Voigt 拟合方法的精度提升了 11 倍。通过以上分析可知，选择卡尔曼滤波算法能够有效提升光谱共焦测量系统的测量精度。

3 结 论

综上，在光谱共焦位移传感器测量实验中，通过对标准平面进行校准，利用中值滤波方法有助于降低光谱采集系统中存在的电流干扰噪声。选用高精度的 Voigt 拟合方法来提取峰值光谱，它的拟合精度高于高斯和洛伦兹拟合。此外，为进一步减小拟合误差，还评估了 Voigt 拟合算法中的中心峰值提取、幅值位置以及 FWHM 等主要参数对峰值提取精度的影响。利用卡尔曼滤波算法能够将定位精度提升 1%，且光谱共焦测量系统的精度提升了 11 倍，测量误差与步进位移台的偏差都为 0.01 mm，验证了卡尔曼滤波算法能够对光谱数据滤波寻峰后的误差进行有效改善，证明了卡尔曼滤波方法的可行性，进而实现了光谱共焦高精度测量。在核工业、精密机床加工和电子元件高精度检测等领域，它是一种非常有前途的检测方法，为高精度的工业检测应用提供参考。

参考文献:

- [1] 刘焱, 王焱. 位移传感器的技术发展现状与发展趋势 [J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(6): 76 – 80, 101.
- [2] YAO Q H, CAO M. Design of optical emission system in 3D shape detection with oblique laser triangulation probe[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1774: 012063.
- [3] 刘佳畅, 黄艳, 贾亚青, 等. 现代光学三维扫描仪工作原理及技术现状综述 [J]. 激光杂志, 2023, 44(7): 21 – 26.
- [4] 郭彤, 胡春光, 陈津平, 等. 垂直扫描白光干涉术用于微机电系统的尺寸表征 [J]. 光学学报, 2007, 27(4): 668 – 672.
- [5] 许险峰, 徐锡金, 霍霞. 共聚焦激光扫描显微镜技术 [J]. 激光生物学报, 2003, 12(2): 156 – 159.
- [6] HERATH M, EMMANUEL C, JEEWANTHA J, et al. Distributed sensing based real-time process monitoring of shape memory polymer components[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(22): 52247.
- [7] BAI J, LI J W, WANG X H, et al. A new method to measure spectral reflectance and film thickness using a modified chromatic confocal sensor[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 154: 107019.
- [8] MINSKY M. Microscopy apparatus: US, 3013467A[P]. 1961–12–19.
- [9] MOLESINI G, PEDRINI G, POGGI P, et al. Focus-wavelength encoded optical profilometer[J]. *Optics Communications*, 1984, 49(4): 229 – 233.
- [10] BROWNE M A, AKINYEMI O, BOYDE A. Confocal surface profiling utilizing chromatic aberration[J]. *Scanning*, 2011, 14(3): 145 – 153.

- [11] YU Q, WANG C, ZHANG Y L, et al. Error analysis and correction of thickness measurement for transparent specimens based on chromatic confocal microscopy with inclined illumination[J]. *Photonics*, 2022, 9(3): 155.
- [12] 周勇, 李建军, 赵天明, 等. 基于光谱共焦的在线集成表面粗糙度测量方法 [J]. *计量学报*, 2021, 42(6): 753 – 758.
- [13] 王津楠, 陈凤东, 刘炳国, 等. 基于白光 LED 的光谱共焦位移传感器 [J]. *中国测试*, 2017, 43(1): 69 – 73.
- [14] 王佳怡, 刘涛, 唐晓锋, 等. 光纤式色散共焦三维测量系统及算法比较研究 [J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1112001.
- [15] MOWLA A, DU B W, TAIMRE T, et al. Confocal laser feedback tomography for skin cancer detection[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(9): 4037 – 4048.
- [16] AGOYAN M, FOURNEAU G, CHEYMOL G, et al. Toward confocal chromatic sensing in nuclear reactors: *in situ* optical refractive index measurements of bulk glass[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2022, 69(4): 722 – 730.
- [17] CHAN M C, LIAO T H, HSIEH C S, et al. Imaging of nanoscale birefringence using polarization-resolved chromatic confocal microscopy[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3965 – 3975.
- [18] 李春艳, 李庚鹏, 刘继红, 等. 基于 GRNN 的光谱共焦位移测量方法分析与研究 [J]. *光子学报*, 2022, 51(3): 0330001.
- [19] RAHLVES M, ROTH B, REITHMEIER E. Confocal signal evaluation algorithms for surface metrology: uncertainty and numerical efficiency[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(21): 5920 – 5926.
- [20] LI J F, ZHAO Y L, DU H, et al. Adaptive modal decomposition based overlapping-peaks extraction for thickness measurement in chromatic confocal microscopy[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36176 – 36187.
- [21] CHEN C, WANG J, LIU X J, et al. Influence of sample surface height for evaluation of peak extraction algorithms in confocal microscopy[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): 6516 – 6526.
- [22] LUO D, KUANG C F, LIU X. Fiber-based chromatic confocal microscope with Gaussian fitting method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4): 788 – 793.
- [23] 陈木旺. 浅谈共聚焦显微技术 [J]. *光学仪器*, 2013, 35(1): 44 – 47.
- [24] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(1): 35 – 45.

(编辑: 张 磊)