A High-Precision Demodulation Method for Fiber Bragg Grating Demodulator Based on Richardson-Lucy Deconvolution Method *

GU Yonghua[1*], WANG Xuewen[2], SHAO Wenjun[2], SU Wensheng[1], LI Yunfei[1]
(1.Jiangsu Special Equipment Safety Supervision and Inspection Research Institute, Nanjing Jiangsu 210036, China;
2.School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China)

Abstract: The fiber Bragg grating demodulator based on MEMS scanning galvanometer is limited by its wavelength scanning principle, and its output scanning laser linewidth is large, resulting in a wider spectral waveform of the fiber Bragg grating sensor output. To this end, a high-precision FBG wavelength demodulation algorithm based on Richardson Lucy (RL) deconvolution method is proposed, which uses deconvolution operation to reduce the 3 dB bandwidth of the output signal. At the same time, in order to eliminate the errors generated by using noisy scanned laser spectra as deconvolution kernels for operation, optimization of the deconvolution kernel is proposed. Finally, a comparative experiment is conducted using scanning laser spectra as the deconvolution kernel and an optimized ideal Gaussian kernel as the deconvolution kernel. The experimental results show that the optimized ideal deconvolution kernel further improves the sensitivity of the system to demodulate small strains and improves the linearity of the demodulator measurement results.

Key words: MEMS galvanometer; fiber Bragg grating sensor; deconvolution algorithm; demodulation accuracy
EEACC: 7220; 7230E **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.014

一种基于 Richardson-Lucy 反卷积法的光纤光栅解调仪高精度解调方法 *

顾永华[1*], 王学文[2], 邵文军[2], 苏文胜[1], 李云飞[1]
(1.江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京 210036; 2.武汉理工大学交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 基于 MEMS 扫描振镜的光纤光栅解调仪受限于其波长扫描原理, 其输出的扫描激光线宽较大, 导致光纤光栅传感器输出光谱波形变宽。为此, 提出一种基于 Richardson-Lucy (RL) 反卷积法的 FBG 波长高精度解调算法, 采用反卷积运算来减小输出信号的 3 dB 带宽。同时为了消除以含有噪声的扫描激光光谱作为反卷积核进行运算产生的误差, 提出对反卷积核进行优化。并开展了以扫描激光光谱作为反卷积核的测试实验和以优化后的理想高斯核作反卷积核的对比实验。实验结果表明, 优化后的理想反卷积核能进一步提高系统解调微小应变的灵敏度, 并改善解调仪测量结果的线性度。

关键词: MEMS 振镜; 光纤布拉格光栅传感器; 反卷积算法; 解调精度
中图分类号: TN911.7; TP183; TP212.14 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0805-07

光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 传感器是一种能够测量温度、应力、振动、压力等物理量的光学传感器[1], 具有结构简单、高灵敏度、高分辨率、安全可靠等优点, 广泛应用于化工、建筑、航空航天、桥梁等领域[2]。当 FBG 传感器测量的物理量发生变化时, 其栅距和折射率会随被测物理量的变化而变化, 导致其反射光中心波长发生变化[3]。因此, 可以通过测量反射光中心波长偏移量来测量被测物理量的改变。

精确解调反射光中心波长的变化是 FBG 传感系统的核心任务。近年来, 徐迎彬[4]研究了基于半导体扫描激光器的 FBG 传感器解调系统, 该系统具有结构简单, 信号计算工作量小, 成本低等特点。文丰等[5]研究了基于 F-P 滤波器的 FBG 传感器解调系统, 采用标准具减小 F-P 滤波器中因压电陶瓷产生的蠕变、迟滞等特性带来的解调误差, 其系统解调精度较高但采样频率不足。部分学者为实现对变化频率高的物理量的精确检测, 开始研究基于 MEMS 振镜可调光滤波器的 FBG 传感器解调系统[6]。由于具有控制简单、测量精度高等优势, 基于 MEMS 扫描振镜的可调光滤波器被逐渐应用在 FBG 光纤光栅解调系统中[7-8]。

项目来源: 国家市场监管总局科技计划项目 (2022MK042)
收稿日期: 2024-03-28 **修改日期**: 2024-08-06

MEMS 振镜可以选择性地将衍射光栅分出的窄带光谱扫描到光路中,从而形成波长连续变化的激光。衍射光栅的刻线密度会对扫描激光的线宽产生影响,而扫描激光的线宽、MEMS 振镜的扫描速度及精度三者的综合作用则决定了 FBG 传感器的解调速度和精度[9]。鉴于 MEMS 振镜的结构及制造精度所限,其振动模式往往包含诸多杂散振动成分,从而导致解调系统从传感器信号中获取的信息存在着较大的噪声干扰,进而影响了解调系统的精度。同时,基于 MEMS 扫描振镜的可调光滤波器所产生的扫描激光线宽往往较大[6],导致解调系统实际测得的 FBG 光谱波形变宽和失真。因此,研究一种能精确解调 FBG 解调系统所采集的光谱信号中心波长的高精度解调算法具有重要意义[10]。

当前,FBG 监测系统常用的解调算法包括直接寻峰算法、功率加权算法、高斯拟合算法、一般多项式拟合算法、高斯多项式拟合算法、遗传算法和蚁群算法等[11]。其中,直接寻峰算法对光谱曲线形状和光滑度的要求较高,当光谱中存在大量噪声时,其准确度较低[12]。功率加权算法是以反射光功率为加权系数计算波长的加权平均值,得到反射光功率在波长方向上分配的中心位置,该算法抗噪性能差,波长解调精度低[13]。一般多项式拟合算法和高斯多项式拟合算法精度较高,但这两种算法过于依赖观测数据,如果峰值不在观测点内,可能导致较大的寻峰误差[14]。遗传算法和蚁群算法准确度较高,但计算量大、求解时间长,不利于 FBG 传感器的快速解调。高斯拟合算法在工程测量中有广泛应用,其解调精度较高[15],但在光谱不对称的情况下,该算法可能产生较大的误差。反卷积算法将由 F-P 腔解调得到的分辨率较低的光功率谱,经过与已知传感光栅光功率谱进行反卷积运算,得到一个比被测光纤光栅光功率谱更接近真实信号的光功率谱。通过这种方法,使得光谱原始信号得以恢复,从而提高光纤光栅波长位移测量的精确度。虽然反卷积法可以提高系统解调精度,但它在信噪比较低的情况下也可能放大信号中的噪声[16-17]。

针对上述问题,本文提出了一种基于 RL 反卷积法的 FBG 波长高精度解调方法,可以通过反卷积运算来减小输出信号的 3 dB 带宽。同时,为了消除以含有噪声的扫描激光光谱作为反卷积核进行运算产生的误差,本文提出了对反卷积核进行优化的方法。最后开展了以扫描激光光谱作为反卷积核的测试实验和以优化后的理想高斯核作反卷积核的对比实验。实验结果表明,RL 反卷积方法能够有效地提高系统解调精度,并对采集数据的线性度有一定优化,同时理想高斯核代替扫描激光光谱作为反卷积核能进一步提高系统灵敏度。

1 测量原理

1.1 基于 MEMS 扫描振镜的光纤光栅解调仪

基于 MEMS 振镜的光纤光栅解调仪利用衍射光栅将宽带光源中不同波长的光在空间上分开,并通过 MEMS 振镜的扫描,选择性地输出窄带光谱。衍射光栅的刻线越密,输出的光谱越窄。同时,在一定的光源功率下,线宽越窄,扫描激光输出功率越低。因此,基于 MEMS 振镜的扫描激光线宽往往不会设计得很窄,这就导致在实际中基于 MEMS 的扫描激光输出光谱 3 dB 带宽相较于半导体激光往往较宽。两者光谱对比示意如图 1 所示。

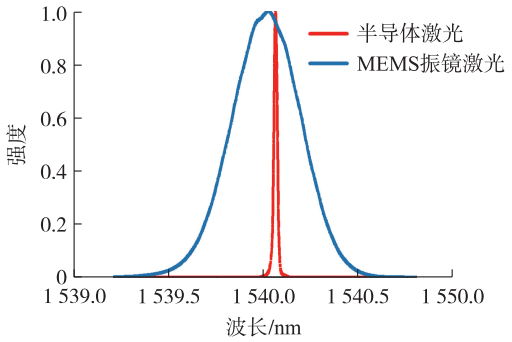


图 1 两种解调仪输出激光的光谱对比

基于 MEMS 扫描振镜可调光滤波器的波长扫描原理如图 2 所示,波长扫描是光纤光栅解调系统的核心。输入光经过透镜后转变为平行光束,平行光束经过光栅的衍射后又分散成不同波长的光,且每个波长对应光栅上特定的衍射角。随后光束进入 MEMS 扫描振镜部分,通过控制振镜的角度,可以改变光束的反射角,从而控制不同波长的光束被反射到输出透镜上的位置。如此,输出透镜上的光束便包含了经过波长选择的信号。根据振镜的运动角度

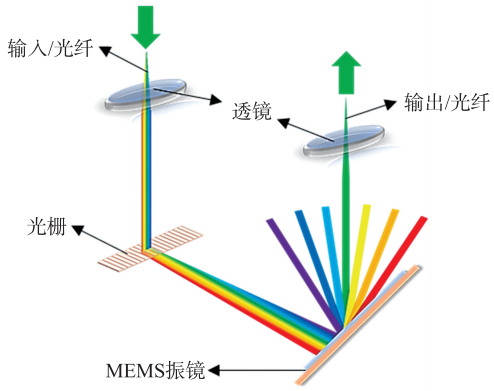


图 2 基于 MEMS 振镜的可调光滤波器波长扫描原理

以及光栅的特性,便能够实现对不同波长光束的选择性输出,从而生成波长扫描激光。波长扫描激光进入 FBG 传感器后会被传感器中光纤光栅所调制,被调制的光最后会被解调系统接收并处理。

1.2　解调系统解调原理

在解调系统中,解调仪接收到的经 FBG 传感器调制后的光学信号并不是 FBG 真实信号,而是系统扫描激光光谱与 FBG 传感器特征光谱卷积的结果,如图 3 所示。

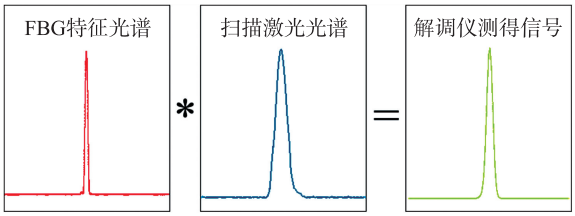


图 3　解调仪测得的信号与 FBG 真实信号关系

假设 FBG 反射光谱为 $f(n)$,扫描激光的光谱为 $h_{FP}(n)$,而系统接收到的信号为 FBG 反射光谱和扫描激光光谱的卷积。忽略系统噪声时,所接收到的光谱信号 $g(n)$ 为:

$$g(n)=f(n)*h_{FP}(n) \tag{1}$$

根据卷积运算定理,式(1)可改写成:

$$g(n)=f(n)*h_{FP}(n)=\mathrm{IDFT}[F(\lambda)\times H(\lambda)]=\mathrm{IDFT}[G(\lambda)] \tag{2}$$

由式(2)可推得 FBG 反射光谱 $f(n)$ 可表示为:

$$f(n)=\mathrm{IDFT}[F(\lambda)]=\mathrm{IDFT}[G(\lambda)/H_{FP}(\lambda)] \tag{3}$$

MATLAB 中反卷积应用示例如图 4 所示:在信噪比仅为 5.0 时,原始信号 y(图 4(a))与卷积核卷积后得到卷积信号 y_c。图 4(c)为卷积信号 y_c 反卷积之后的结果,由于原始信号中含有蓝噪声,直接反卷积并不能还原原始信号 y。因此,对反卷积后的信号进行平滑处理得到与原始信号 y 具有相同特征的还原信号 y_{dc}(图 4(d))。然而,实际测量到的信号中包含测量系统本身引起的随机噪声,并不一定是高频蓝噪声,直接利用傅里叶反卷积往往效果很差[18]。

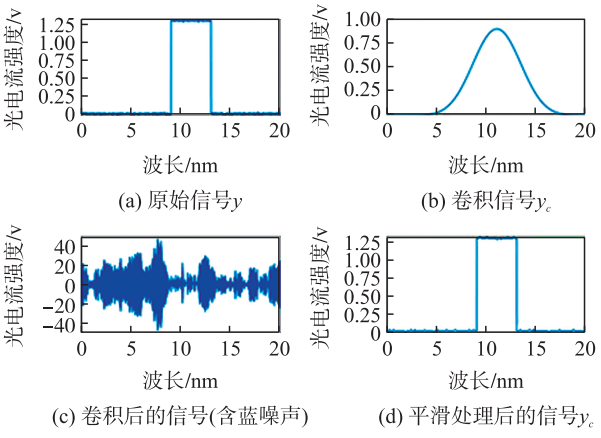


图 4　反卷积应用示例

系统的精度测量原理是基于重心法的寻峰函数来确定波峰的重心位置。通过对比波峰重心偏移的距离来反映实际应力的变化。通过对比前后两组数据中心波长的差值来评估系统的灵敏度。在微小应变条件下,差值越大代表解调系统的灵敏度越高。此外,光谱中心位置解调值的线性度越高,表示解调系统解调的准确度也越高。其重心法数学表达式如下:

$$X_C=(X_1\times Y_1+X_2\times Y_2+\cdots+X_n\times Y_n)/(Y_1+Y_2+\cdots+Y_n)$$
$$Y_C=(Y_1+Y_2+\cdots+Y_n)/n \tag{4}$$

X、Y 分别表示数据点的横坐标和纵坐标,n 为数据点的个数,X_C 就是中心波长的估计值。

1.3　基于 RL 的反卷积法

RL 反卷积法是一种用于图像处理和计算机视觉领域的算法,结合了反卷积和最大似然估计迭代两种思想。在解调过程中,通过多次迭代求解,不断改进估计数据,还原真实的原始数据。令 R 表示数据恢复的结果,O 表示待恢复的测量数据,H 表示卷积核。算法迭代公式如下:

$$R(k+1)=R(k)\times O/[R(k)\times H] \tag{5}$$

式中:$R(k+1)$ 表示第 $k+1$ 轮迭代的估计数据,$R(k)$ 表示第 k 轮迭代的估计数据。每一轮迭代都会产生新的 $R(k)$。通过多次迭代,估计数据将不断接近真实原始数据,从而达到恢复原始数据的目的。

1.4　RL 反卷积法的反卷积核优化与迭代次数

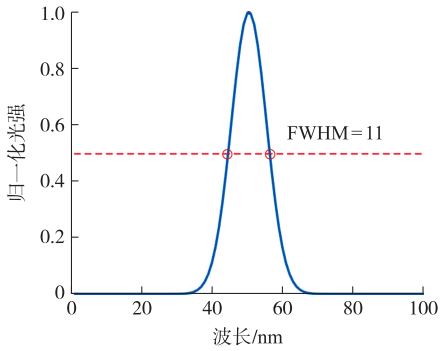
在最大似然估计框架下,RL 反卷积法通过反复计算真实信号的估计值,并进行迭代以逐步逼近真实数据。在这个过程中,反卷积核的设计以及迭代次数的选择是算法的核心。

利用光谱仪可以直接测得基于 MEMS 振镜的光纤光栅解调系统扫描激光光谱,如图 5 所示。由于测量的误差以及其他噪声干扰,扫描激光光谱两端带有一定的微小噪声,直接使用扫描激光原始光谱作为反卷积核无法达到最优效果。为了获得最佳处理结果,需要对反卷积核进行优化。

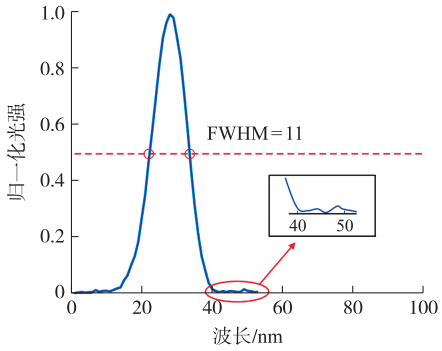
由图 5 可知,扫描激光光谱近似于高斯分布。一种优化方法是基于高斯模型,通过分析扫描激光光谱参数,例如峰值、半高全宽等,依据这些参数构建出新的反卷积核(理想高斯核),如图 5 所示。

优化后的理想高斯核与扫描激光光谱具有相似的波形参数。对于同一组数据,理想高斯核处理后其 FWHM 相较于扫描激光光谱处理后的信号进一步减小,并且原始数据中微小噪声的影响也被进一步抑

制。两者对同一组数据处理的结果如图 6 所示。

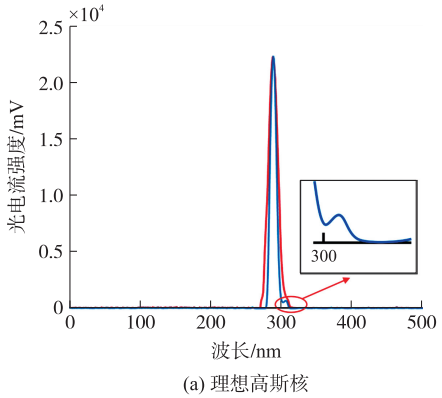


(a) 理想高斯核

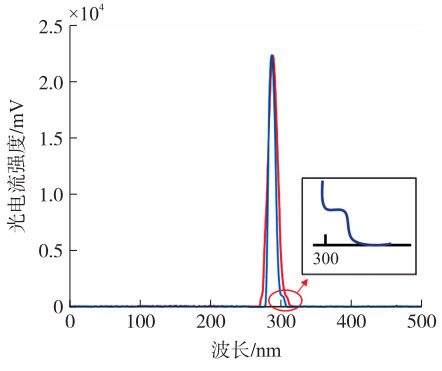


(b) 扫描激光光谱

图 5 理想高斯核和扫描激光光谱对比图



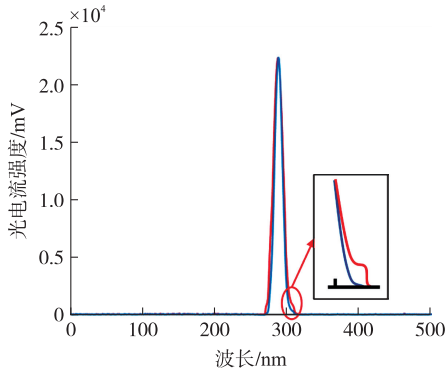
(a) 理想高斯核



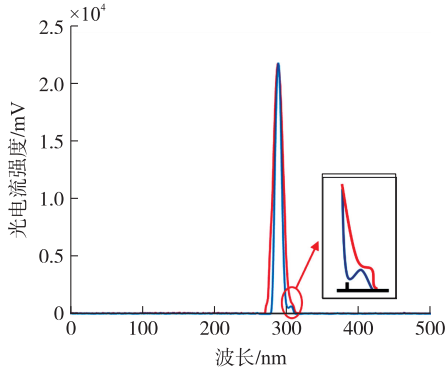
(b) 扫描激光光谱

图 6 理想高斯核和扫描激光光谱处理结果对比图

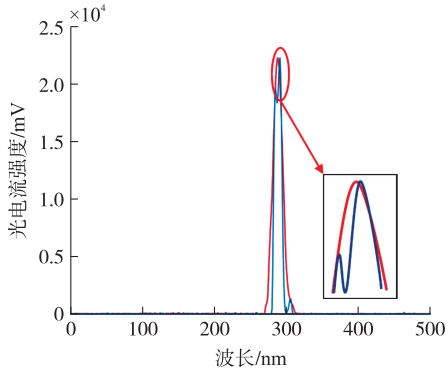
RL 算法在选择迭代次数时,通常需要考虑初始数据的准确性、噪声水平、处理结果要求等。迭代次数过少,会使数据处理达不到实验要求;迭代次数过多,会导致处理后的数据波形发生混乱从而造成误差。迭代次数为 2、15、30 处理后效果对比如图 7 所示。因此,选择 15 作为算法迭代次数,这样既减小了测量信号的 FWHM,也不会使处理后的信号发生混乱。



(a) 迭代次数2



(b) 迭代次数15



(c) 迭代次数30

图 7 迭代次数过多和过少效果对比

2 实验验证与分析

为了验证所提出的反卷积方法对基于 MEMS 振镜的光纤光栅传感器解调精度的提升效果。首先使用等强度悬臂梁与基于 MEMS 振镜的解调仪系统进行数据采样,接着测量解调系统输出的扫描激光光谱,以获得系统的卷积核,并对测得的卷积核进行优化。最后运用不同的卷积核对采样数据进行解调计算,并将计算结果与原始数据进行对比。通过比较不同卷积核下解调数据的差值和线性度,可以

评估解调的灵敏度和准确性,从而评价 RL 反卷积法在恢复真实传感器信号和提高测量精度方面的表现,进一步验证本文所提出方法的有效性。

2.1　光纤光栅传感解调仪应变测试实验

如图 8 所示,将光纤光栅传感器贴在量程为 3 000 微应变的等强度悬臂梁实验台上,利用 4 个重量为 5 N 的砝码使等强度悬臂梁在 5 N、10 N、20 N 重力下产生不同的应变,贴于等强度悬臂梁表面的 FBG 传感器也将发生不同程度的形变。在三种不同预加载荷的基础上,再使用 1 g~10 g 砝码依次进行加载和卸载,测试每克重量产生的微小应变对 FBG 传感器的影响,每组重复 10 次求平均值,分别求得每克加载波长变化的均值,并计算出算法平均耗时为 2.707 s,实验结果如图 9 所示。

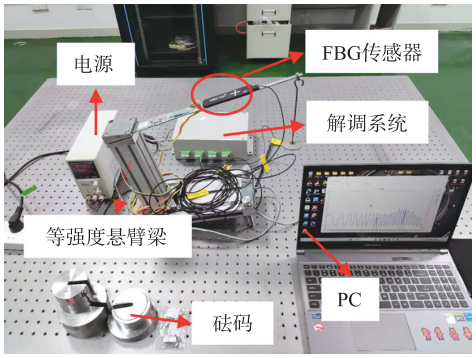
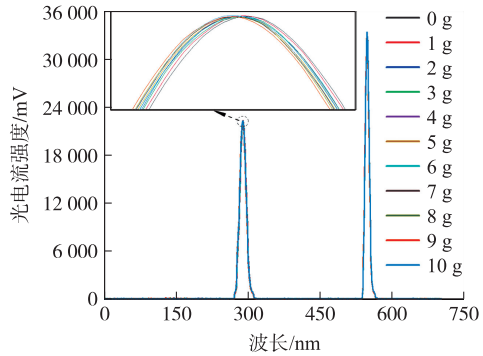
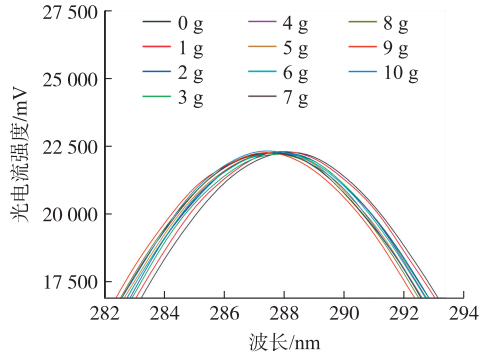


图 8　光纤光栅传感解调系统应变测试实验装置



(a) 中心波长平均值数据分布图



(b) 局部放大图

图 9　1 g~10 g 微小应变下中心波长平均值数据

2.2　MEMS 振镜扫描激光光谱测试实验

MEMS 振镜扫描激光光谱测试实验装置如图 10 所示,将基于 MEMS 振镜的解调仪与光谱仪连接,这样光谱仪就可以直接测量扫描激光光谱,也就是系统输出到 FBG 的光波信号。

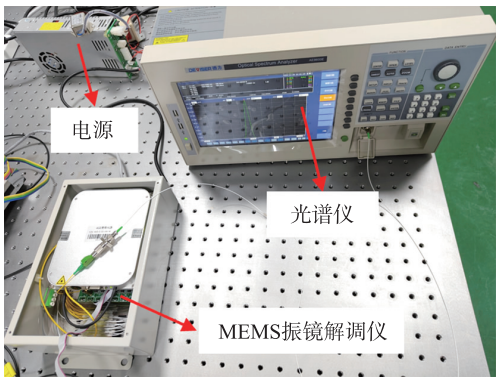


图 10　MEMS 振镜扫描激光光谱测试实验装置

为了验证不同应力变形下算法的有效性。根据应变测试实验在 5 N、10 N、20 N 不同应力变形条件下的中心波长值,控制 MEMS 振镜为固定的三个不同角度,这样可输出与该 3 组应变下中心波长相同的 3 组光谱信号。通过图 10 所示的光谱仪可以直接测量该 3 组光谱的波形曲线,因此便得到了 MEMS 振镜扫描激光光谱的准确数据,即系统的卷积核。

2.3　实验结果与分析

2.3.1　测量微小应变的灵敏度对比

为了验证理想高斯核对解调精度提升效果更明显,将由光谱仪测得的扫描激光光谱和优化后的理想高斯核作为算法反卷积核对原始数据进行运算处理,得到两种反卷积核处理后的解调精度,如图 11 所示。

实验证明,在每次增加 1 g 砝码来产生应力变形的条件下,原始数据、理想高斯核处理后的数据和扫描激光光谱处理后的数据总的应力峰中心波长变

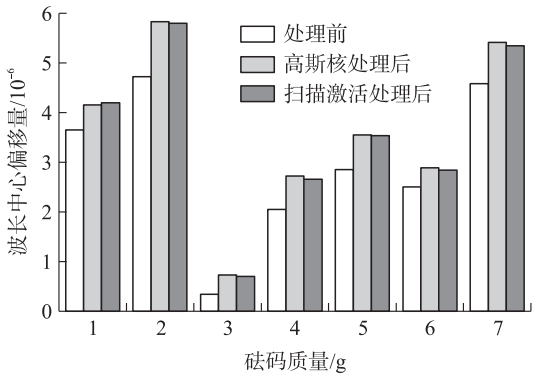


图 11　微小应变下解调灵敏度对比

化分别为 20.71 pm、25.31 pm 和 25.11 pm，理想高斯核和扫描激光光谱均能实现对解调系统解调精度的优化，理想高斯核相比于扫描激光光谱对原始数据的精度优化更明显，在相同应变情况下，理想高斯核处理后的数据应力峰偏移的距离更大，对于微小应变的检测相比于原始数据有着 22.21%优化提升。

2.3.2 测量微小应变的线性度对比

为验证反卷积后数据线性度的变化，利用 MATLAB 中的线性度计算函数（线性度越小越好），对原始数据和反卷积处理后的数据进行线性度测试，测得的结果如图 12 所示。

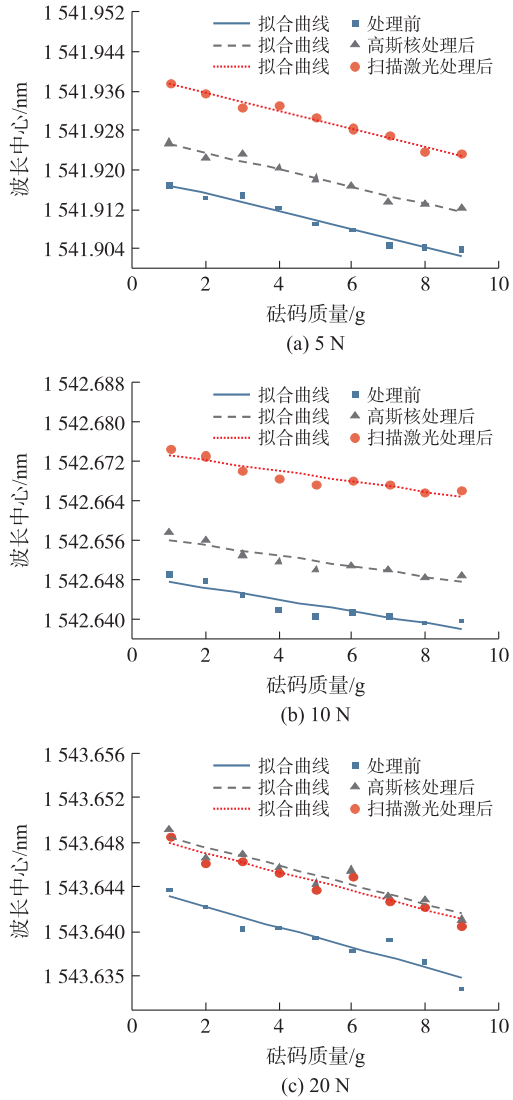


图 12 理想高斯核和 MEMS 振镜扫描激光光谱处理数据线性度对比

实验结果表明，在 5 N 砝码应力变形条件下，原始数据的线性度、理想高斯核处理后的数据线性度和扫描激光光谱处理后的数据线性度分别为 0.032 665、0.030 096 和 0.029 027，理想高斯核和扫描激光光谱均能实现对原始数据的线性度优化，优化程度分别为 8.5%和 12.5%。在其他应力变形条件下理想高斯核处理后的数据线性度都略优于扫描激光光谱处理后的数据线性度，提升效果分别为 22.2%、20.6%和 42.18%、42.17%。这表明理想高斯核在解调精度最优的情况下，对数据的线性度也有一定的提升，可适用于工业中对 FBG 精度要求较高且要求数据具有一定线性度的场合。

3 结论

本文基于反卷积算法，通过使用基于 RL 的反卷积方案，旨在解决基于 MEMS 扫描振镜的光纤光栅解调系统 3 dB 带宽过宽影响解调精度的问题，同时对比了以理想高斯核和扫描激光光谱作为反卷积核的实验结果。结果证明，理想高斯核相较于扫描激光光谱在相同微应变情况下应力峰偏移得更明显，对于微小应力变化的解调灵敏度相比于原始数据提升了 18.64%。同时，在解调系统线性度的优化上理想高斯核比扫描激光光谱也更为明显。本文提出的以理想高斯核作为 RL 反卷积方法的反卷积方案在提高解调精度的前提下对系统的线性度也有一定优化，平均优化程度为 24%。在检测微小应变和提高解调仪解调精度的领域具有一定的现实意义。

参考文献：

[1] Mao L, Tao C, Zhang J, et al. Multiplexed Dynamic Strain Sensing System Based on a Fiber Ring Laser Using a Non-Tunable Fiber Fabry-Perot filter[J]. Applied Optics, 2020, 59(8): 2375-2379.

[2] Zhu W X, Shen Q X, Qin H Y. Monitoring of Prestress and Bond Stress of Self-Sensing FBG Steel Strand[J]. Measurement, 2021, 177: 109246.

[3] 甄茜. 基于 F-P 滤波器的高精度光纤光栅解调系统研究[D]. 北京：中国运载火箭技术研究院，2019.

[4] 徐迎彬. 扫描半导体激光器技术研究及在光纤传感中的应用[D]. 济南：山东大学，2016.

[5] 文丰，张岩，贾兴中. 基于 F-P 可调谐滤波器的光纤光栅解调系统设计[J]. 电子测量技术，2022, 45(9): 38-43.

[6] 杜贺朋，刘秀峰，彭家春，等. 基于 MEMS 振镜的光纤光栅高速解调系统[J]. 电子器件，2026, 49(1): 45-50.

[7] Takahashi Y. High-Speed MEMS-OSA and Its Application to Fiber Sensors[C]//Second European Workshop on Optical Fibre Sensors, Santander, Spain, SPIE, 2004, 5502: 33-38.

[8] Saitoh T, Nakamura K, Takahashi Y, et al. High-Speed MEMS Swept-Wavelength Light Source for FBG Sensor System[C]//17th International Conference on Optical Fibre Sensors, Bruges, Belgium, SPIE, 2005, 5855: 146-149.

[9] Lai C C, Chang I N, Hwang C, et al. A Magnetic Microsensor with Temperature Compensation Based on Optical Mechatronic Technology[J]. Materials Science Forum, 2011, 670: 164-170.
[10] 尚秋峰,林炳花. 光纤 Bragg 光栅传感系统典型寻峰算法的比较分析[J]. 电测与仪表,2010,47(2):1-4.
[11] 韩超,胡宾鑫,朱峰,等. 光纤光栅高精度解调算法研究进展综述[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(13):42-54.
[12] Janzen F C, Martelli C, Mezzadri F. Peak Detection Algorithm for Fiber Bragg Grating Sensors[C]//2012 Latin America Optics and Photonics Conference, Sao Sebastiao, Brazil, 2012: LM2A. 8.
[13] 冯忠伟,张力,何彦璋,等. 基于衍射光栅的光纤光栅传感器解调系统研究[J]. 计测技术,2011,31(4):16-18.
[14] 陈勇,王坤,刘焕淋,等. 三点寻峰算法处理光纤布拉格光栅传感信号[J]. 光学精密工程,2013,21(11):2751-2756.
[15] Sadhukhan D, Mitra M. R-Peak Detection Algorithm for ECG Using Double Difference and RR Interval Processing[J]. Procedia Technology, 2012, 4: 873-877.
[16] 曾喜娟. 反卷积法提高光纤光栅传感器解调精度的分析[J]. 广东石油化工学院学报,2011,21(6):38-40.
[17] 李海岗,隋青美,姜明顺. 提高基于 F-P 腔的光纤光栅解调精度的研究[J]. 光学与光电技术,2008,6(3):11-13,17.
[18] Khan M K, Morigi S, Reichel L, et al. Iterative Methods of Richardson-Lucy-Type for Image Deblurring[J]. Numerical Mathematics: Theory, Methods and Applications, 2013, 6(1): 262-275.

顾永华(1977—),男,高级工程师,硕士,主要从事工业自动化等方面的研究,11568621@qq.com;

王学文(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为港口装备智能运维,13970632570@163.com;

李云飞(1984—),男,工程师,硕士,主要从事机械工程等方面的研究,yf98@163.com。