

引用格式: MAO Tianyu, LI Qi, GAO Pufeng, et al. Strain Measurement Range Extension in OFDR Based on Sliding Window Optimization and Gaussian Filtering[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(8):0806003

毛天宇,李琦,高浦峰,等. 基于滑动窗优化与高斯滤波的 OFDR 应变测量范围扩展方法[J]. 光子学报, 2026, 55(8):0806003

基于滑动窗优化与高斯滤波的 OFDR 应变测量范围扩展方法

毛天宇¹, 李琦¹, 高浦峰¹, 樊庆赓¹, 汪鑫¹, 武蓓蕾¹, 刘艳¹, 张建勇¹,
陈德胜², 王目光¹

(1 北京交通大学 光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

(2 北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081)

摘 要:光频域反射分布式应变传感中,大应变条件下的位置失配会导致应变解调误差。本文提出了一种结合滑动窗优化与高斯滤波的应变解调方法,以扩展应变测量范围。首先提出了基于滑动窗优化的位置补偿方法,该方法基于波长偏移连续性和互相关相似性的判决条件,对异常解调结果进行识别,随后在距离域内移动参考信号并进行互相关计算,利用最大互相关峰值衡量信号相似性,从而确定最佳匹配位置,实现位置偏差补偿。结合高斯滤波去除解调图像中的随机噪声,提升测量精度。实验结果表明,在 4.32 nm 波长扫描范围和 7.4 mm 空间分辨率下,相较传统位置补偿法,所提出的滑动窗优化方法将应变测量范围由 300 $\mu\epsilon$ 扩展至 600 $\mu\epsilon$,应变均方根误差、平均绝对误差和标准差分别降低了 73.90%、80.26% 和 72.62%。而结合滑动窗优化与高斯滤波的应变解调方法将应变测量范围扩展至 1500 $\mu\epsilon$,相较传统位置补偿法,应变均方根误差、平均绝对误差和标准差分别降低了 98.72%、97.12% 和 99.14%。该方法为光频域反射系统在保持高空间分辨率的前提下扩展应变测量范围提供了一种新解调方案,拓展了其应用场景。

关键词:光纤传感;分布式应变传感;光频域反射;瑞利散射;互相关算法

中图分类号: TP212

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20265508.0806003

0 引言

分布式光纤传感器(Distributed Optical Fiber Sensors, DFOS)具有高灵敏度、抗电磁干扰和易于集成等诸多优势^[1]。根据光纤中的不同散射效应,DFOS 主要分为瑞利散射^[2]、布里渊散射^[3]和拉曼散射^[4]三种传感机制。基于瑞利散射的光频域反射(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR)能够实现高空间分辨率和高灵敏度的分布式应变测量,已被广泛应用于环境监测^[5,6]、土木结构健康监测^[7,8]以及航空航天^[9]等领域。OFDR 系统通常采用互相关解调算法测量沿光纤的应变分布信息。然而,当应变过大时,参考信号与测量信号在距离域会产生位置失配,二者相似性下降,导致互相关解调结果出现伪峰,最终导致应变解调错误^[10]。此外,受光源扫频非线性、相位噪声及环境振动等噪声影响,提高空间分辨率会导致互相关性下降,造成应变解调误差^[11,12]。因此,位置偏差和系统噪声共同限制了 OFDR 系统在高空间分辨率下的应变测量范围。

为解决上述问题,研究人员提出了多种改进方法。通过位置偏差补偿,可以有效提升信号相似性。ZHAO Shiyuan 等提出了一种结合频谱配准与空间标定(Spectrum Registration And Spatial Calibration,

基金项目:国家自然科学基金(62371035)

第一作者:毛天宇,23120093@bjtu.edu.cn

通讯作者:王目光,mgwang@bjtu.edu.cn

收稿日期:2026-04-01;录用日期:2026-06-11

<http://www.photon.ac.cn>

SR+SC)的应变测量方法,在20 nm扫频范围下实现了5 mm空间分辨率和7000 $\mu\epsilon$ 的测量范围^[13]。ZHANG Hongwei等利用峰均比对互相关结果的质量进行评价,并对位置偏差进行补偿,在30 nm扫频范围下使空间分辨率由8 cm提高至2 cm,同时将最大测量范围扩展至5000 $\mu\epsilon$ ^[14]。QU Shuai等提出了一种基于参考信号的相关光谱自补偿方案,在40 nm扫频范围下实现了2 mm空间分辨率和10000 $\mu\epsilon$ 的应变测量范围^[15]。GAN Yu等提出了一种基于双段瑞利散射谱相似性特征(Dual-Segment Rayleigh Scattering Spectrum Similarity, DS-RSS-S)的OFDR方法,采用局部光谱段作为新的瑞利散射参考信号并优化滑动窗口,在5 nm扫频范围下实现了32.6 mm空间分辨率和2500 $\mu\epsilon$ 的测量范围^[16]。LI Shuai等提出自校正二维互相关OFDR方法,通过构建频域参考信号二维阵列,在40 nm扫频范围下实现了3 mm空间分辨率下8000 $\mu\epsilon$ 的应变测量^[17]。YANG Ling等提出一种基于优化最近邻滑动窗口阈值的OFDR应变解调方法,通过动态去除噪声峰值,有效提升了大应变测量中互相关解调的精度与可靠性;在100 nm扫频范围下,该方法实现了2.48 mm的空间分辨率与10000 $\mu\epsilon$ 的应变测量范围,为大动态范围应变测量提供了可行方案^[18]。BAI Qing等提出一种最优光谱相似性追踪(Optimal Spectral Similarity Pursuit, OSSP)方法,通过优化局部光谱相似性补偿光谱失配,在20 nm扫频范围下实现了6 mm空间分辨率和10000 $\mu\epsilon$ 的测量范围^[19]。

与此同时,一些研究将图像处理方法引入OFDR应变传感,以提升应变量程和测量精度。QU Shuai等将OFDR分布式频谱偏移视为二维图像,通过小波变换、高斯滤波等图像处理方法去除虚假峰值,在40 nm扫频范围下实现了4 mm分辨率、7000 $\mu\epsilon$ 的应变梯度测量,拓展了OFDR应变测量范围^[20]。LI Pengfei等提出了一种结合距离补偿与图像小波去噪(Distance Compensation And Image Wavelet Denoising, DC+IWD)的OFDR传感方法,在10 nm扫频范围下实现了2.56 mm空间分辨率和2000 $\mu\epsilon$ 的应变测量范围,并将测量精度提高约4倍^[21]。AI TENGhua等提出了一种基于位置自校正算法与非均匀高斯滤波的OFDR分布式应变传感系统,通过对互相关图像进行非均匀滤波抑制噪声,在20 nm扫频范围下实现了4 mm空间分辨率和8000 $\mu\epsilon$ 的应变测量范围^[22]。

本文提出了一种结合滑动窗优化与高斯滤波的应变解调方法。首先提出了基于滑动窗优化的位置补偿方法,基于波长偏移连续性和互相关相似性的判决条件,对异常解调结果进行识别,随后在距离域内移动参考信号并进行互相关计算,利用最大互相关峰值确定最优匹配位置,实现位置偏差补偿。在此基础上结合高斯滤波对二维解调图像进行去噪,以抑制随机噪声。最后通过实验对比分析了传统互相关法、传统位置补偿法^[20]、滑动窗优化法和滑动窗优化与高斯滤波改进方法的应变测量范围和应变测量误差,验证了该方法在保持高空间分辨率的同时扩展了OFDR系统的应变测量范围。

1 基本原理

1.1 OFDR系统基本原理

本文采用的OFDR系统结构如图1所示。可调谐激光器(Tunable Laser Source, TLS)输出连续扫频光信号,经光耦合器(Optical Coupler, OC1)后分为两路,分别进入主干涉仪(Main Interferometer, MI)和辅助干涉仪(Auxiliary Interferometer, AI)。主干涉仪中,通过OC2分为参考支路和测量支路。其中,大部分光作为探测光经光环行器(Circulator, CIR)注入待测光纤(Fiber Under Test, FUT),产生的背向瑞利散射信号与参考支路中的参考光在OC3处发生相干干涉。在TLS触发信号的控制下,干涉信号经平衡光电探测器(Balanced Photodetector, BPD)转换为电信号后,由数据采集卡(Data Acquisition, DAQ)完成采集,用于后续信号处理。参考支路和测量支路中的偏振控制器(Polarization Controller, PC)用于调节光的偏振态,从而提高干涉对比度。辅助干涉仪由延迟光纤(Delay Fiber)、OC4和OC5组成,用以补偿可调谐激光器的非线性扫频效应。

OFDR系统通常采用互相关解调算法获取光纤上的应变分布^[10],互相关解调过程如图2所示。首先采集应变施加前后的两组拍频信号,应变施加前作为参考信号(Reference Signal, RS),应变施加后作为测量信号(Measurement Signal, MS)。将参考信号和测量信号通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)由时域转为距离域。随后采用矩形滑动窗对参考信号和测量信号的距离域信号进行截取,得到局部参考信号和局部测量信号。对二者分别进行逆傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)后进行

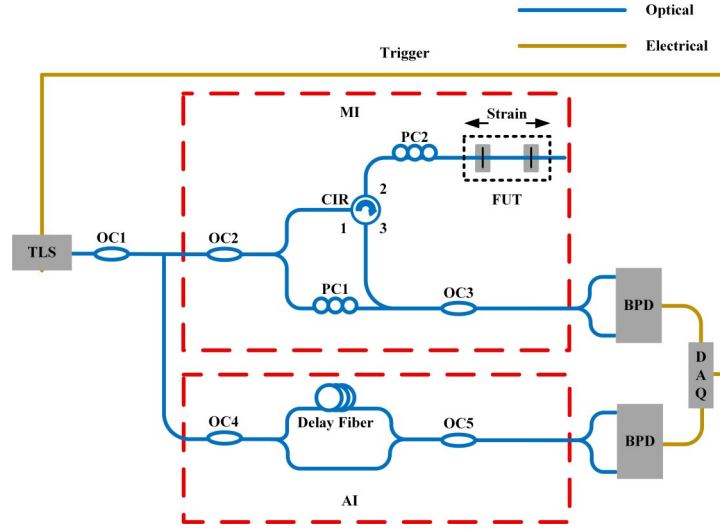


图1 OFDR系统结构

Fig. 1 OFDR system configuration

互相关,得到互相关峰值偏移量即为波长偏移信息。最后沿光纤移动滑动窗口位置,重复上述步骤,依次获取沿光纤分布的波长偏移分布信息。根据波长偏移与应变的线性关系,可得沿待测光纤的应变分布。波长偏移量 $\Delta\lambda$ 和应变 $\Delta\epsilon$ 的关系表示为^[23]

$$\Delta\lambda = (1 - P_e) \cdot \lambda \cdot \Delta\epsilon \quad (1)$$

式中, P_e 表示光纤的有效弹光系数, λ 表示光源中心波长。定义 $K_e = (1 - P_e)\lambda$ 为应变灵敏度系数,可通过实验标定。

OFDR系统的传感空间分辨率 ΔX 表示为^[24]

$$\Delta X = N \frac{c}{2n\Delta F} \quad (2)$$

式中, N 表示矩形滑动窗口长度, c 表示真空中的光速, n 表示光纤的折射率, ΔF 表示可调谐激光器的扫频范围。OFDR应变测量精度 ϵ_{ac} 表示为^[25]

$$\epsilon_{ac}^2 \cdot (\Delta X)^3 \geq \frac{c^3}{n^3 f_c^2} \cdot \frac{1}{\text{SNR}} \cdot \frac{1}{\Delta F} \quad (3)$$

式中,SNR表示背向瑞利散射信噪比, f_c 表示光源中心频率。在本征噪声的限制下,随着滑动窗口长度减小,空间分辨率逐渐提高,参与互相关计算的数据点减少,参考信号和测量信号的相关性降低,应变测量精度逐渐下降。

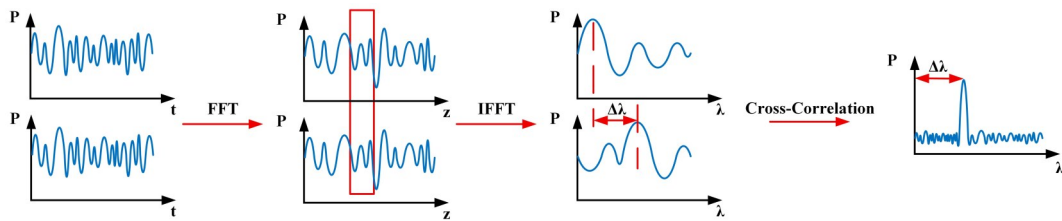


图2 OFDR系统中的互相关解调原理

Fig. 2 Cross-correlation demodulation principle of OFDR

1.2 基于滑动窗优化与高斯滤波的OFDR应变解调原理

当不施加应变时,滑动窗截取的参考信号和测量信号存在相同的中心位置。当存在大应变时,光纤局部受到拉伸,测量信号相对参考信号产生位置偏差,造成信号相似性下降^[26],互相关结果出现伪峰,这导致应变解调精度下降甚至解调错误。同时,随着空间分辨率提高,参与互相关运算的数据点减少,信号相似性

也会降低,造成解调误差。为了扩展高空间分辨率下 OFDR 应变测量范围,本文提出了一种基于滑动窗优化与高斯滤波的应变解调方法,如图 3 所示。该方法包括两个过程,即基于滑动窗优化的位置补偿方法和基于高斯滤波的图像去噪方法,在图中用蓝色虚线框标出。

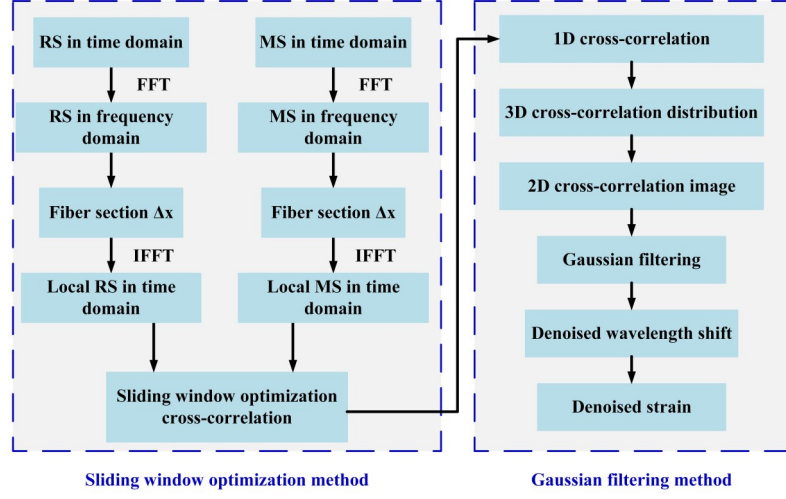


图3 基于滑动窗优化与高斯滤波的 OFDR 系统应变解调流程图

Fig. 3 Flowchart of OFDR strain demodulation based on sliding-window optimization and Gaussian filtering

首先利用滑动窗优化算法进行位置偏差补偿,该算法包括三个步骤,流程如图 4 所示。

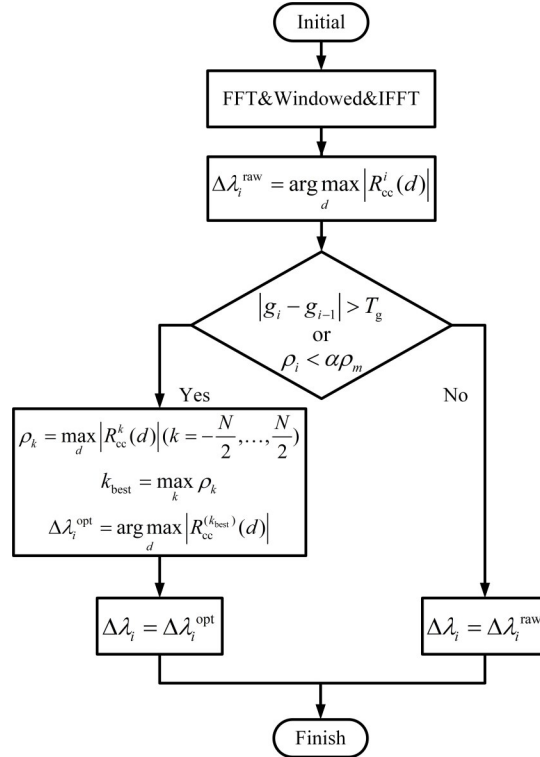


图4 滑动窗优化算法流程图

Fig. 4 Flowchart of the sliding-window optimization algorithm

步骤 1:原始互相关解调。对采集数据进行信号处理,得到距离域的参考信号 $S_r(z)$ 与测量信号 $S_m(z)$,在距离域对信号加窗截取,获得第 i 个滑动窗对应的局部参考信号 $S_r(i)$ 和局部测量信号 $S_m(i)$ 。随后通过 IFFT 得到波长域的局部参考信号 $S_r(\lambda)$ 和局部测量信号 $S_m(\lambda)$,对二者进行互相关运算,表示为

$$R_{cc}(d) = \int S_r(\lambda) S_m(\lambda + d) d\lambda \quad (4)$$

通过互相关函数的最大峰值位置可确定第*i*个窗口的原始波长偏移量 $\Delta\lambda_i^{\text{raw}}$,表示为

$$\Delta\lambda_i^{\text{raw}} = \arg \max_d |R_{\text{cc}}^i(d)| \quad (5)$$

步骤2:异常窗口检测。针对上述获得的原始波长偏移量,引入异常窗口检测。本文提出一种基于波长偏移连续性和互相关相似性的判决条件。实际波长偏移分布符合连续性特征,因此定义一种基于波长偏移连续性的判决条件。首先,当前滑动窗的波长偏移梯度 g_i 表示为

$$g_i = \Delta\lambda_i^{\text{raw}} - \Delta\lambda_{i-1} \quad (6)$$

式中, $\Delta\lambda_{i-1}$ 为第*i*-1个滑动窗口经算法优化后得到的最终波长偏移量。当满足式(7)时,判定当前解调结果异常,表示为

$$|g_i - g_{i-1}| > T_g \quad (7)$$

式中, T_g 为梯度变化阈值,可通过实验标定。此外,互相关函数的峰值越大,参考信号与测量信号之间的相似性越高^[27],因此定义一种基于互相关相似性的判决条件。首先,当前位置互相关函数的峰值 ρ_i 表示为

$$\rho_i = \max_d |R_{\text{cc}}^i(d)| \quad (8)$$

计算前*j*个窗口的最大峰值的中位数 $\rho_m = \text{median}(\rho_{i-j}, \dots, \rho_{i-1})$,*j*取值为5。当满足式(9)时,认为当前互相关相似性过低,判定此时的解调结果存在异常,表示为

$$\rho_i < \alpha \rho_m \quad (9)$$

式中, α 取值为0.9。定义 $\Delta\lambda_i$ 为第*i*个滑动窗口经算法优化后得到的最终波长偏移量。当式(7)和式(9)均不成立时,直接输出 $\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_i^{\text{raw}}$;否则判定当前窗口异常,进入步骤3。

步骤3:滑动窗优化。互相关峰值 ρ_i 表征了参考信号和测量信号之间的相似性。 ρ_i 越大,信号相似性越高,此时两信号间的位置偏差越小^[27]。因此该步骤引入 ρ_i 表征信号相似性,以滑动窗口长度*N*为搜索范围,对参考信号以单采样点的步长逐点移动,并计算各偏移位置下参考信号与测量信号的互相关结果。由上述原理可知, ρ_i 最大时,对应的参考信号与测量信号的相似性最高,此时二者的位置偏差最小,互相关结果的准确性最高,应变解调精度得以提升。而传统互相关算法处理大应变梯度时,只能根据固定的滑动窗口进行互相关操作,无法改善互相关相似性。由于大应变下的位置偏差,互相关峰值 ρ_i 降低,甚至出现伪峰,这会导致应变解调错误。该步骤具体实现流程如下:对于判定异常的窗口,在参考窗口附近进行局部搜索,设定搜索步长为1,即每移动一个采样点,则重新计算互相关函数并提取峰值 ρ_k ,表示为

$$\rho_k = \max_d |R_{\text{cc}}^k(d)| \quad (k = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}) \quad (10)$$

式中,*k*表示参考窗口相对原始位置的偏移点数。搜索范围内互相关峰值的最大值对应的位置即为最佳匹配参考信号,此时的移动点数 $k_{\text{best}} = \arg \max_k \rho_k$,优化后的波长偏移量 $\Delta\lambda_i^{\text{opt}}$ 表示为

$$\Delta\lambda_i^{\text{opt}} = \arg \max_d |R_{\text{cc}}^{(k_{\text{best}})}(d)| \quad (11)$$

将优化后的波长偏移量作为最终输出值,表示为 $\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_i^{\text{opt}}$,根据应变灵敏度系数可解调出当前位置的应变值。综上所述,传统互相关法通过解调固定窗口内参考信号与测量信号之间的瑞利散射光谱偏移实现应变测量,其前提是两者在距离域内具有正确的空间对应关系。然而,在大应变条件下,位置偏差会导致参考信号与测量信号之间出现空间失配,造成有效瑞利散射特征的重叠程度降低,使互相关峰值减小并降低了解调精度。而滑动窗优化方法通过在距离域内对参考窗口进行滑动搜索,并利用互相关峰值表征信号相似性,通过寻找互相关峰值最大的匹配位置,实现对大应变引起的位置偏差补偿,从而恢复参考信号与测量信号之间的正确空间位置关系,提高互相关结果的准确性,进而提升应变解调精度。

再结合高斯滤波对解调图像进行去噪。虽然滑动窗优化法可以有效补偿大应变下的位置偏差,但是随着空间分辨率提高,信号相似性降低,导致互相关结果中存在伪峰,系统仍会产生解调误差。因此需要结合高斯滤波,对滑动窗优化法处理后的互相关结果进行去噪。具体步骤为:滑动窗优化法处理后,将各滑动窗的一维互相关曲线按照光纤距离进行排列,构建峰值位置、距离和强度的三维互相关图像^[28]。将其沿强度方向投影到二维平面上构建二维互相关图像^[29, 30]。其中,每个像素点的横坐标表示光纤空间位置,纵坐标表

示峰值偏移量,颜色表示其强度。互相关伪峰在二维图像中表现为噪声,可通过二维图像去噪算法去除。高斯滤波是一种基于高斯函数的线性平滑滤波器,主要用于消除高斯噪声等高频噪声,同时保留低频信息使图像平滑。二维高斯滤波的定义表示为^[31]

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + \beta y^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

式中, σ 表示高斯分布的标准差, x 和 y 分别表示像素在横轴、纵轴方向距离原点的距离, β 表示 y 方向的权重。二维互相关图中,横轴对应距离,纵轴对应波长偏移。互相关伪峰沿纵轴分布,因此令纵轴方向的标准差大于横轴方向的标准差,可以保持较高分辨率的同时抑制噪声,提升应变精度。最后,沿距离方向识别二维图像中强度最大的互相关峰位置,从而获得对应的波长偏移量。

为定量评估所提出算法的应变测量精度,引入均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和标准差(Standard Deviation, SD)的评价指标。RMSE为测量值和标准值之间差值的均方根,表示为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\epsilon_i - \epsilon_i^a)^2} \quad (13)$$

式中, M 为应变区域滑动窗的数量, ϵ_i 为每个滑动窗口的应变测量值, ϵ_i^a 为每个滑动窗口内施加的应变标准值。RMSE运算过程会加剧大误差的影响,对大的异常测量值更敏感。MAE为测量值与标准值之间绝对误差的平均值,反映了误差的平均水平,表示为

$$\text{MAE} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |\epsilon_i - \epsilon_i^a| \quad (14)$$

SD用于描述测量值的离散程度,可用于评估测量值的稳定性和噪声水平,表示为

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2} \quad (15)$$

式中 $\bar{\epsilon}$ 为全部测量值的均值。

2 实验装置与结果分析

2.1 OFDR系统实验装置

为了验证基于滑动窗优化与高斯滤波的OFDR应变解调方法的性能,根据1.1节的原理分析,本文搭建了基于OFDR的分布式应变传感实验装置。TLS输出的连续扫频光经1:99的OC1分为两路,99%的光进入主干涉仪,随后经1:99的OC2分为两束,1%进入参考支路,称为参考光,99%进入传感光纤产生背向瑞利散射信号,称为信号光。参考光与信号光在50:50的OC3处发生相干干涉,输出的光信号由BPD转换为拍频电信号,随后由DAQ采集用于后续信号解调。另外1%的光进入辅助干涉仪,辅助干涉仪由两个50:50的OC4、OC5,以及10 m延迟光纤构成,用于补偿TLS的非线性扫频效应。OFDR系统参数设置如下:TLS的波长扫描范围为4.32 nm,扫描速度为480 nm/s,输出功率为10 mW。DAQ的采样频率为100 MHz,采样时间为9 ms。待测光纤长度约为0.9 m,通过两个位移平台对待测光纤末端40 cm区域施加应变。施加在光纤上的应变可表示为

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (16)$$

式中, L 为两位移平台间的初始光纤长度, ΔL 为两位移平台的相对移动距离,由于位移平台的精度为0.01 mm,因此施加在40 cm光纤段上的最小应变为25 $\mu\epsilon$,实验中每次移动位移平台0.12 mm,对应施加应变步长为300 $\mu\epsilon$ 。辅助干涉仪中延迟光纤长度为10 m,实验中采用基于一维插值的非线性补偿算法^[32],利用辅助干涉仪产生的拍频信号对主干涉仪拍频信号进行补偿,非线性补偿后的OFDR拍频信号频谱如图5所示,图中强反射峰对应传感光纤末端的菲涅尔反射。补偿后OFDR系统的两点空间分辨率为0.2 mm,与理论系统空间分辨率0.185 mm相符合。因此,系统的扫频非线性被很好地补偿,在0.9 m的传感距离内,解调结果与扫频非线性引起的空间坐标映射误差无关。

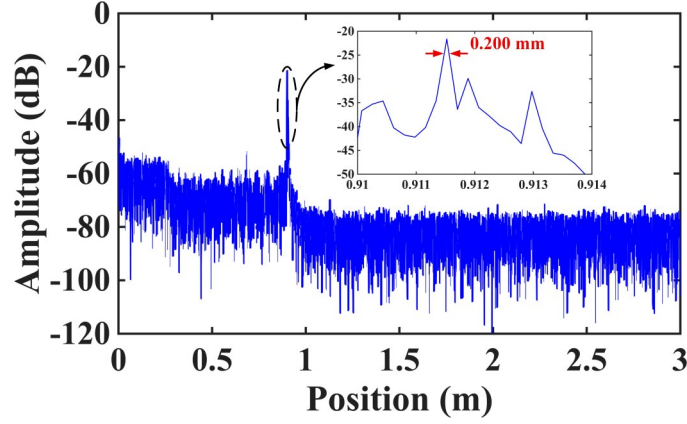


图5 非线性补偿后,OFDR拍频信号频谱

Fig. 5 The spectrum of the OFDR beat signal after nonlinearity compensation

2.2 结果分析

为了验证滑动窗优化与高斯滤波改进方法在扩展应变量程、提升测量精度方面的有效性,本文开展了多组应变加载实验,实验中以 $300 \mu\epsilon$ 为间隔,在传感光纤上施加 $0 \mu\epsilon$ 到 $1500 \mu\epsilon$ 的应变,通过调整互相关解调中的滑动窗口大小改变空间分辨率。首先采用传统互相关法进行解调,展示了 $1500 \mu\epsilon$ 应变范围内,不同空间分辨率下的波长偏移解调结果。滑动窗口的长度 N 分别为 40、80 和 160,对应的空间分辨率分别为 7.4 mm、14.8 mm 和 29.6 mm。互相关解调前对每个滑动窗补零至 1024 点,以提升应变测量精度。如图 6(a) 所示,当空间分辨率为 7.4 mm 时,可以正确解调 $0 \mu\epsilon$ 到 $300 \mu\epsilon$ 的应变。当施加应变超过 $300 \mu\epsilon$ 时,应变区域尾部及无应变区的波长偏移曲线出现异常值,且随着应变增大,应变区域前端也开始出现异常值,使得应变信息难以识别。这是由于大应变导致的位置偏差会降低互相关信噪比,产生解调误差。此外,应变边缘区域也存在异常值,这是由于滑动窗覆盖范围包括应变区和非应变区,导致互相关结果不准确。如图 6(b) 和 (c) 所示,随着滑动窗口长度增加,空间分辨率降低,此时参考信号和测量信号的相关性提高,异常值有所减少。但施加应变超过 $600 \mu\epsilon$ 时,波长偏移曲线始终存在异常值。

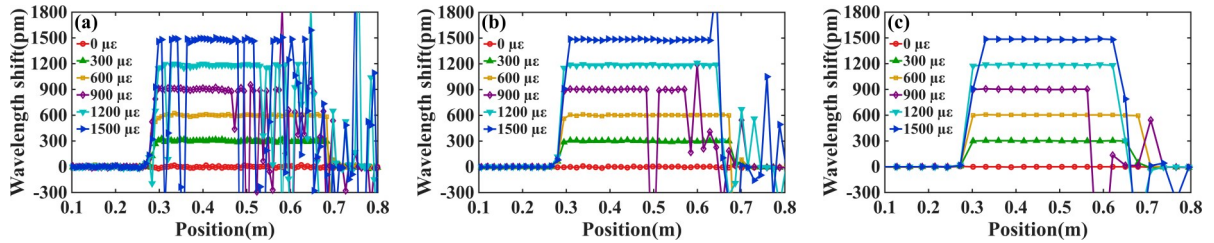


图6 不同空间分辨率下传统互相关法的波长偏移解调结果。(a)7.4 mm 空间分辨率;(b)14.8 mm 空间分辨率;(c)29.6 mm 空间分辨率

Fig. 6 Wavelength shift demodulation results of the conventional cross-correlation method at different spatial resolutions. (a) 7.4 mm spatial resolution; (b) 14.8 mm spatial resolution; (c) 29.6 mm spatial resolution

为了消除大应变下的异常解调值,本文对比了传统位置补偿法、滑动窗优化法及滑动窗优化与高斯滤波改进方法的处理结果。其中,传统位置补偿法通过计算局部应变导致的位置偏差进行连续迭代补偿,完成局部应变解调后,针对下一段光纤的应变解调过程,对参考信号的距离域施加长度为 Δl 的位置补偿,表示为^[20]

$$\Delta l = \epsilon_i \Delta X \quad (17)$$

通过重复上述过程,可获得沿光纤分布的应变信息。如图 7 所示,空间分辨率为 7.4 mm 时,对比了 $1500 \mu\epsilon$ 应变下三种方法的二维互相关图及波长偏移解调结果。图 7(a) 和 (d) 分别展示了传统位置补偿法的二维图像及波长偏移曲线。结果表明,二维图像中存在大量偏离真实峰值的噪声,波长偏移曲线中出现大量异常值,应变信息难以识别。这主要是由于传统位置补偿算法在高空间分辨率下,一旦当前滑动窗的

应变解调值存在误差,就会导致下一滑动窗的位置偏差补偿值不准确,并产生误差累积,错误的补偿值导致信号相似度下降,互相关结果出现大量伪峰。因此,高空间分辨率下传统位置补偿法失效。图7(b)和(e)分别展示了滑动窗优化法的二维图像及波长偏移曲线。实验中通过系统噪声统计特性确定异常窗口判定阈值。首先对两组不施加应变的参考信号进行互相关解调,异常窗口判定阈值为两倍波长偏移曲线标准差,即25 pm。结果表明,所提出的滑动窗优化算法可以很好地提升互相关结果的准确性,显著消除了互相关结果中的伪峰,进而抑制了二维图像中的噪声,这种低噪数据特征与高斯滤波的适配性良好,可充分发挥高斯滤波的降噪优势。图7(c)和(f)则展示了滑动窗优化与高斯滤波改进方法的二维图像及对应的波长偏移曲线。实验中高斯滤波在距离方向和波长偏移方向的标准差分别设置为2和3。结果表明,该算法具有更好的去噪效果,真实峰值区域与背景区域之间对比度显著提升,波长偏移曲线的异常值和随机波动被有效抑制,提高了应变解调精度。

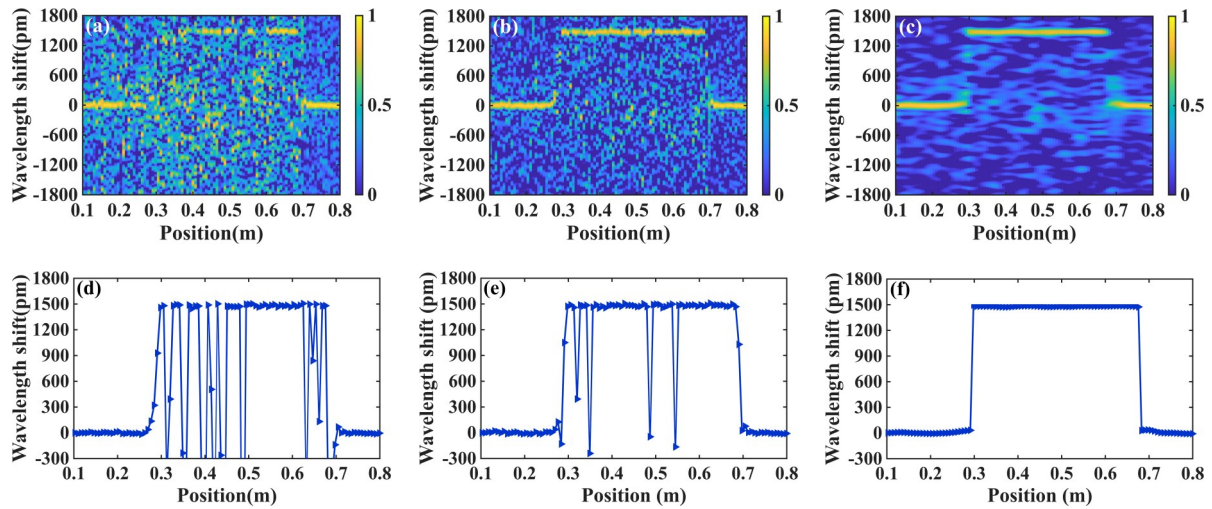


图7 1500 $\mu\epsilon$ 应变下三种方法的二维图像和波长偏移解调结果。(a)传统位置补偿法的二维图像;(b)滑动窗优化法的二维图像;(c)滑动窗优化与高斯滤波改进方法的二维图像;(d)传统位置补偿法的波长偏移曲线;(e)滑动窗优化法的波长偏移曲线;(f)滑动窗优化与高斯滤波改进方法的波长偏移曲线

Fig. 7 Two-dimensional cross-correlation maps and wavelength shift demodulation results of three methods at 1500 $\mu\epsilon$. (a) Two-dimensional cross-correlation map of the conventional position compensation method; (b) Two-dimensional cross-correlation map of the sliding-window optimization method; (c) Two-dimensional cross-correlation map of the sliding-window optimization - Gaussian filtering method; (d) Wavelength shift curve of the conventional position compensation method; (e) Wavelength shift curve of the sliding-window optimization method; (f) Wavelength shift curve of the sliding-window optimization - Gaussian filtering method

为验证所提出的滑动窗优化法处理得到的低噪声图像有助于提升高斯滤波的去噪效果。在7.4 mm空间分辨率和1500 $\mu\epsilon$ 应变下,绘制了传统位置补偿算法经高斯滤波后的二维互相关图和波长偏移曲线,如图8(a)和(b)所示,实验中高斯滤波在距离方向和波长偏移方向的标准差分别设置为2和3。结果表明,传统位置补偿算法经高斯滤波后,二维图像中仍存在大量偏离真实峰值的噪声,波长偏移曲线中出现大量异常解调值。这是由于传统位置补偿算法处理后的二维图像存在大量噪声,导致高斯滤波的效果不佳。综上,基于滑动窗优化与高斯滤波的应变测量方法中,滑动窗优化法主要用于补偿大应变条件下的空间位置失配,以提高互相关结果的准确性,进而为高斯滤波提供低噪声二维图像;而高斯滤波则可以很好地处理低噪声的二维图像,对系统噪声和互相关伪峰进行抑制,从而提高峰值定位的准确性。二者互为补充,共同实现了高空间分辨率下的大应变测量。

为验证传统位置补偿法、滑动窗优化法及滑动窗优化与高斯滤波改进方法在不同应变下的有效性。如图9所示,当空间分辨率为7.4 mm时,对比了1500 $\mu\epsilon$ 应变范围内三种方法的波长偏移解调结果。

如图9(a)所示,传统位置补偿法可正确解调不超过300 $\mu\epsilon$ 的应变,当应变在600 $\mu\epsilon$ 到1500 $\mu\epsilon$ 时,应变区域末端的波长偏移曲线中出现大量异常值,波长偏移量难以识别。随着应变增加,异常值逐渐增加。如

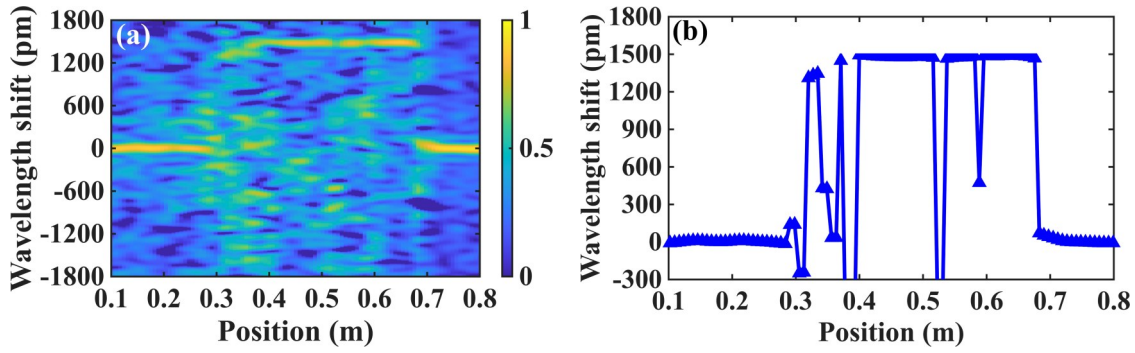


图8 $1500\ \mu\epsilon$ 应变下传统位置补偿算法经高斯滤波后的二维图像和波长偏移解调结果。(a)二维图像;(b)波长偏移曲线
Fig. 8 Two-dimensional image and wavelength shift demodulation results of traditional position compensation algorithm with Gaussian filtering under $1500\ \mu\epsilon$ strain. (a) Two-dimensional image; (b) Wavelength shift curve

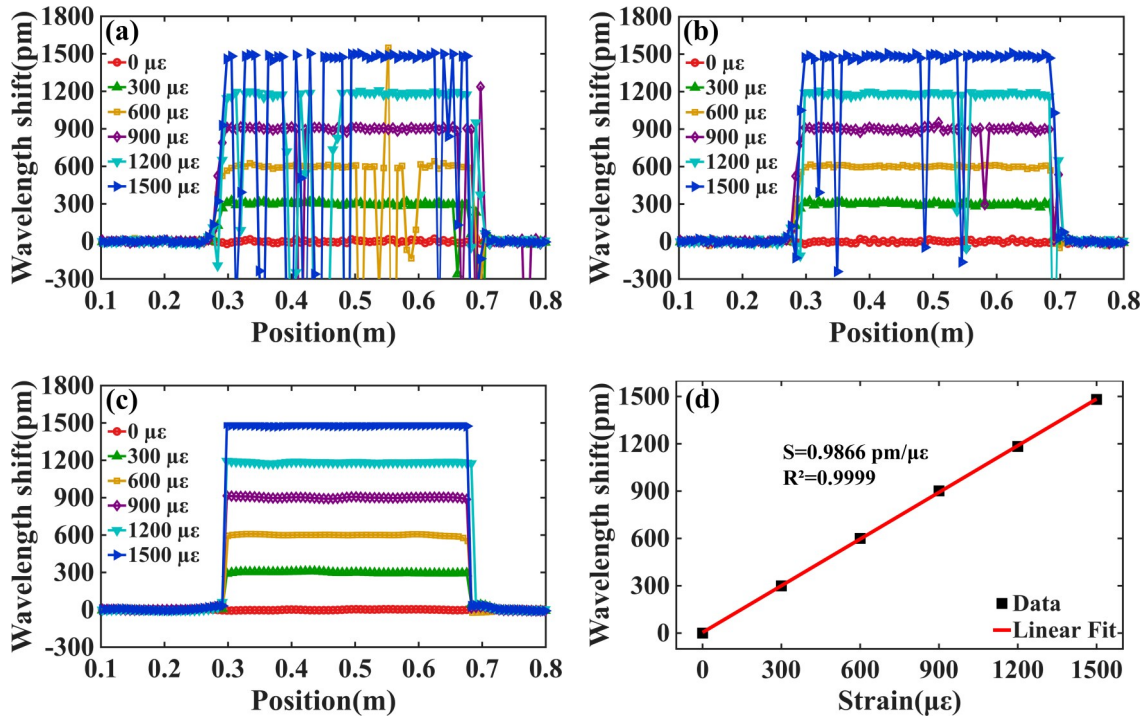


图9 $1500\ \mu\epsilon$ 应变范围内三种方法的波长偏移解调结果及波长偏移与应变的关系。(a)传统位置补偿法的波长偏移曲线;(b)滑动窗优化法的波长偏移曲线;(c)滑动窗优化与高斯滤波改进方法的波长偏移曲线;(d)滑动窗优化与高斯滤波改进方法的波长偏移与应变关系

Fig. 9 Wavelength shift demodulation results of the three methods and the relationship between wavelength shift and strain within the $1500\ \mu\epsilon$ strain range. (a) Wavelength shift curve of the conventional position compensation method; (b) Wavelength shift curve of the sliding-window optimization method; (c) Wavelength shift curve of the sliding-window optimization method combined with Gaussian filtering; (d) Relationship between wavelength shift and strain for the sliding-window optimization method combined with Gaussian filtering

图9(b)所示,滑动窗优化法可正确解调不超过 $600\ \mu\epsilon$ 的应变。当应变在 $900\ \mu\epsilon$ 到 $1500\ \mu\epsilon$ 时,波长偏移曲线中仍存在少量异常解调值,但解调精度相对传统位置补偿法显著提升,验证了滑动窗优化法的有效性。如图9(c)所示,在 $1500\ \mu\epsilon$ 应变范围内,滑动窗优化与高斯滤波改进方法完全消除了波长偏移曲线中的全部异常值,波长偏移分布均匀一致。如图9(d)所示,计算了滑动窗优化与高斯滤波改进方法处理后,应变区域内的波长偏移量与加载应变之间的线性拟合曲线。结果表明,波长偏移与外部施加的应变呈高度线性关系,应变灵敏度为 $0.9866\ \text{pm}/\mu\epsilon$, R^2 为 0.9999 ,进一步验证了所提出方法可有效扩展应变量程,提升应变解调精度。综上,相较于传统位置补偿法,滑动窗优化法的应变测量范围由 $300\ \mu\epsilon$ 扩展至 $600\ \mu\epsilon$ 。在此基础上结合

高斯滤波后,滑动窗优化与高斯滤波改进方法的应变测量范围进一步扩展至 1500 $\mu\epsilon$ 。

为了定量评估滑动窗优化与高斯滤波改进方法的测量精度,本文计算了该算法在不同应变水平下的 RMSE、MAE 和 SD,如表 1 所示。结果表明,采用所提出算法处理后,RMSE、MAE 和 SD 的最大值分别为 14.25 $\mu\epsilon$ 、13.51 $\mu\epsilon$ 和 5.57 $\mu\epsilon$ 。RMSE 和 MAE 数值接近,说明解调结果中不存在较大的异常解调值,SD 仅为 5.57 $\mu\epsilon$,说明应变解调结果具有较高的一致性。上述结果表明所提出算法在不同应变水平下均具有较高的测量精度。

表 1 不同应变下滑动窗优化与高斯滤波改进方法的应变测量误差

Table 1 Strain measurement errors of the sliding window optimization and Gaussian filtering improved method under different strain levels

Strain / $\mu\epsilon$	RMSE / $\mu\epsilon$	MAE / $\mu\epsilon$	SD / $\mu\epsilon$
300	6.45	5.20	5.57
600	10.20	9.51	5.52
900	14.25	13.51	4.58
1200	3.68	2.68	3.57
1500	3.92	3.42	3.71

为了进一步定量评估传统互相关算法(Conventional Cross-Correlation, CC)、传统位置补偿法(Conventional Position Compensation, CPC)、滑动窗优化法(Sliding-Window Optimization, SWO)以及滑动窗优化与高斯滤波改进方法(Sliding-Window Optimization with Gaussian Filtering, SWO-GF)的测量精度,本文计算了空间分辨率为 7.4 mm 时,1500 $\mu\epsilon$ 应变范围内各方法测量应变的 RMSE、MAE 和 SD,如表 2 所示。结果表明,CC 和 CPC 的解调误差较大,RMSE 均远大于 MAE,由于 RMSE 对大的异常值敏感,说明传统互相关算法和传统位置补偿法的解调结果中存在较多大异常值。其中,传统位置补偿算法由于当前窗口的位置补偿量取决于前一窗口的应变值,当空间分辨率较高时,前一窗口异常解调值产生的位置补偿误差会累积到下一窗口,导致该算法的测量误差大于传统互相关算法。引入滑动窗优化机制后,SWO 的 RMSE 降至 141.74 $\mu\epsilon$,说明该方法能一定程度上降低解调误差,但 RMSE 大于三倍 MAE,说明解调结果仍存在少量大异常值。相比之下,SWO-GF 方法的 RMSE、MAE 和 SD 分别降低至 6.94 $\mu\epsilon$ 、6.21 $\mu\epsilon$ 和 4.36 $\mu\epsilon$,说明该方法可以完全消除异常值,应变曲线更加平滑均匀,显著提升了应变测量精度。综上,相较 CC,SWO 的 RMSE、MAE 和 SD 分别降低了 64.63%、79.03% 和 61.28%;相较于 CPC,SWO 的 RMSE、MAE 和 SD 分别降低了 73.90%、80.26% 和 72.62%。进一步结合高斯滤波后,相较 CC,SWO-GF 的 RMSE、MAE 和 SD 降低了 98.27%、96.95% 和 98.78%,在三种评价指标下的精度增益比分别为 57.74、32.74 和 82.06;相较于 CPC,SWO-GF 的 RMSE、MAE 和 SD 降低了 98.72%、97.12% 和 99.14%,在三种评价指标下的精度增益比分别为 78.26、34.78 和 116.05。表明该方法能够进一步提升解调精度与稳定性。

表 2 1500 $\mu\epsilon$ 应变范围内四种方法的应变测量误差

Table 2 Strain measurement errors of the four methods within the 1500 $\mu\epsilon$ strain range

Method	RMSE / $\mu\epsilon$	MAE / $\mu\epsilon$	SD / $\mu\epsilon$
CC	400.73	203.33	357.76
CPC	543.13	215.98	505.99
SWO	141.74	42.64	138.52
SWO-GF	6.94	6.21	4.36

由于各解调算法的核心差异在于互相关计算次数不同,因此本文从互相关计算角度对比分析了不同解调算法的时间复杂度。CC 和 CPC 的时间复杂度为 $O(W \times M_0^2)$,式中, W 表示滑动窗口数量,取值为 96,对应解调区间为 0.1 m 至 0.8 m,空间分辨率为 7.4 mm。 M_0 表示参与互相关计算的点数,取值为 1024,由滑动窗口数据经频域补零后的长度确定。相较于 CC,CPC 不需要额外的互相关计算,因此二者具有相同的时间复杂度。而 SWO 与 SWO-GF 的时间复杂度为 $O(W \times M_0^2 + W_a \times N \times M_0^2)$ 。该式由两部分组成,其中 $W \times M_0^2$ 表示所有滑动窗口均需进行的一次基础互相关计算,用于异常窗口判决。 $W_a \times N \times M_0^2$ 表示所

有异常滑动窗口所需的多次额外互相关计算,式中 W_a 表示被判定为异常的滑动窗数量, N 表示参考信号搜索范围,取值为 40,即每个异常窗口需额外进行 40 次互相关计算。相较于 SWO, SWO-GF 增加了高斯滤波过程。为验证上述分析,本文对比分析了 CC、CPC、SWO 和 SWO-GF 在 $1500\ \mu\epsilon$ 应变范围内,解调区间为 0.1 m 至 0.8 m,空间分辨率为 7.4 mm 时的平均处理时间,如表 3 所示。结果表明,实际处理时间和理论分析基本一致,CC 与 CPC 的处理时间比较接近。而 SWO-GF 的处理时间是 CPC 的 17.23 倍,SWO 的处理时间约为 CPC 的 13.41 倍。这表明 SWO-GF 算法的时间开销主要来源于滑动窗优化算法,高斯滤波仅占较小开销。由于滑动窗优化过程中部分窗口被判定为异常窗口,产生了额外的互相关计算,因此 SWO-GF 的处理时间增加。在未来工作中将探索现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)或图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)等硬件加速方案,以提升算法的实时处理能力。

表 3 $1500\ \mu\epsilon$ 应变范围内四种方法处理时间的对比分析Table 3 Comparative analysis of processing time for four methods within the $1500\ \mu\epsilon$ strain range

Method	Spatial resolution /mm	Time /s
CC	7.4	0.016
CPC	7.4	0.022
SWO	7.4	0.295
SWO-GF	7.4	0.379

通过对研究现状的分析,本文总结了基于不同方法的 OFDR 系统应变测量性能,如表 4 所示。结果表明,现有算法凭借宽扫频范围,采用较大的滑动窗口长度 N 即可实现高空间分辨率。而扫频范围较窄时,为了实现高空间分辨率,需要减少滑动窗口长度,这会造成参与互相关的点数减少,信号相似度下降,导致解调精度下降甚至产生解调错误。所提出方法的优势在于,能够在 4.32 nm 窄扫频范围,滑动窗口长度为 40、对应 7.4 mm 空间分辨率条件下,实现 $1500\ \mu\epsilon$ 的应变测量范围。

表 4 基于不同方法的 OFDR 系统应变测量性能

Table 4 Strain measurement performance of OFDR systems based on different methods

Work	Method	Frequency sweep range /nm	N	Spatial resolution /mm	Sensing range / $\mu\epsilon$
Ref. [13]	SR+SC	20	125	5	7000
Ref. [16]	DS-RSS-S	5	200	32.6	2500
Ref. [19]	OSSP	20	150	6	10000
Ref. [21]	DC+IWD	10	32	2.56	2000
This work	SWO-GF	4.32	40	7.4	1500

为验证滑动窗优化与高斯滤波改进方法在非均匀应变下的解调性能,开展了非均匀应变实验。

实验中,将 2.5 m 长的待测光纤对称粘贴在铁片的上下两侧,保持粘贴位置对称。铁片长度为 0.5 m,厚度为 0.1 mm。通过将铁片弯曲为 S 形曲线,对待测光纤施加非均匀应变。图 10 展示了 7.4 mm 空间分辨率下,传统位置补偿法和滑动窗优化与高斯滤波改进方法的波长偏移解调结果。实验结果表明,滑动窗优化与高斯滤波改进方法能够完全消除异常解调值,提升应变测量精度,验证了该方法在非均匀应变下的良好适用性。

3 结论

本文提出了一种结合滑动窗优化与高斯滤波的 OFDR 应变解调方法,在保持高空间分辨率的同时扩展了应变测量范围。首先提出了基于滑动窗优化的位置补偿法,该方法能够识别异常解调值,随后在距离域内滑动参考信号,利用互相关峰值确定最佳匹配位置,实现位置偏差补偿。再结合高斯滤波抑制随机噪声,提升应变测量精度。实验结果表明,在 4.32 nm 波长扫描范围和 7.4 mm 空间分辨率下,相较于传统位置补偿法,所提出的滑动窗优化方法将应变测量范围由 $300\ \mu\epsilon$ 扩展至 $600\ \mu\epsilon$,均方根误差、平均绝对误差和标准差分别降低了 73.90%、80.26% 和 72.62%。在此基础上,结合滑动窗优化与高斯滤波的应变解调方法将应变测量范围扩展至 $1500\ \mu\epsilon$,相较传统位置补偿法,应变均方根误差、平均绝对误差和标准差分别降低了

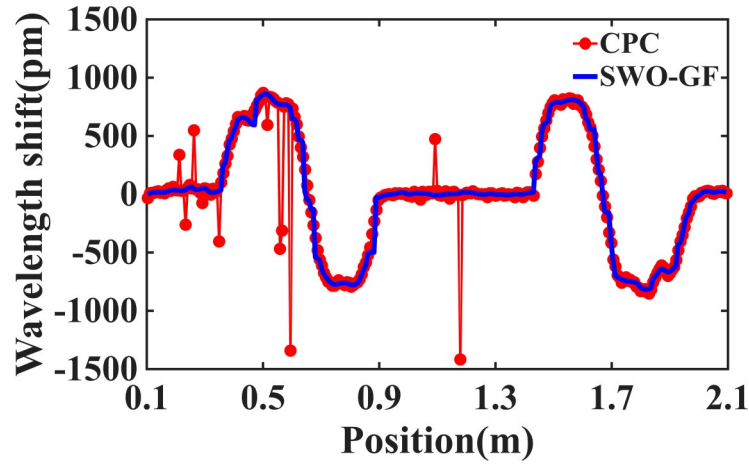


图10 非均匀应变下传统位置补偿法和滑动窗优化与高斯滤波改进方法的波长偏移解调结果

Fig. 10 Wavelength shift demodulation results of the conventional position compensation method and the sliding-window optimization method combined with Gaussian filtering under non-uniform strain

98.72%、97.12% 和 99.14%。

参考文献

- [1] DING Zhenyang, GUO Haohan, LIU Kun, et al. Advances in distributed optical fiber sensors based on optical frequency-domain reflectometry: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(22): 26925-26941.
- [2] LI Shuai, XU Yanping, LIU Zhaojun, et al. High spatial resolution implementation method for OFDR system based on convolution neural network[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(24): 30481-30489.
- [3] QU Weichun, CHEN Ruijia, LI Yang, et al. High flatness microwave frequency comb based on stimulated Brillouin scattering effect[J]. Acta Photonica Sinica, 2025, 54(4): 0423001.
曲蔚淳, 陈睿佳, 李阳, 等. 基于受激布里渊散射效应的高平坦度微波频率梳[J]. 光子学报, 2025, 54(4): 0423001.
- [4] LI Zhenglin, SHEN Binglin, ZHOU Sisi, et al. Fast label-free stimulated Raman scattering microscopy imaging based on 3D self-supervised learning (invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2025, 54(9): 0954203.
李政林, 沈炳林, 周思思, 等. 基于三维自监督学习的快速无标记受激拉曼散射显微成像(特邀)[J]. 光子学报, 2025, 54(9): 0954203.
- [5] ANJANA K, HERATH M, EPAARACHCHI J. Optical fibre sensors for geohazard monitoring - a review[J]. Measurement, 2024, 235: 114846.
- [6] CUI Guoqiang, GOEL Kanika, WU Rui, et al. Autoclavable OFDR-based hydrogel-coated optical fiber sensor for real-time pH monitoring in small-scale bioreactors[J]. Measurement, 2026, 266: 120489.
- [7] SUN Zhen, WANG Xin, HAN Tianran, et al. Pipeline deformation monitoring based on long-gauge fiber-optic sensing systems: Methods, experiments, and engineering applications[J]. Measurement, 2025, 248: 116911.
- [8] CHEN Xianfeng, LI Xiaolong, FU Botao, et al. FBG strain sensing technology-based gas pipeline leak monitoring and accurate location[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 159: 108102.
- [9] WANG Jiang, TANG Ruixi, CHEN Jianjun, et al. Study of straight-line-type Sagnac optical fiber acoustic sensing system[J]. Photonics, 2023, 10(1): 83.
- [10] FENG Kunpeng, CUI Jiwen, JIANG Dong, et al. Improvement of the strain measurable range of an OFDR based on local similar characteristics of a Rayleigh scattering spectrum[J]. Optics Letters, 2018, 43(14): 3293-3296.
- [11] CHEN Wei, MA Xiaohui, MA Qinglin, et al. Denoising method of the Φ -OTDR system based on EMD-PCC[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(10): 12113-12118.
- [12] LIU Kaijun, YIN Guolu, ZHANG Zeheng, et al. Sub-millimeter resolution and high-precision Φ -OFDR using a complex-domain denoising method [J]. Optics Letters, 2023, 49(1): 29-32.
- [13] ZHAO Shiyuan, CUI Jiwen, SUO Liujia, et al. Performance investigation of OFDR sensing system with a wide strain measurement range[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(15): 3721-3727.
- [14] ZHANG Hongwei, XIA Yihua, ZHANG Zijing, et al. Location deviation correction method based on cross-correlation spectrum in OFDR[J]. Applied Optics, 2023, 62(29): 7798-7804.
- [15] QU Shuai, ZHANG Qihao, BAI Shuo, et al. High spatial resolution and wide strain measurement of optical frequency domain reflectometry based on correlation spectrum self-compensation method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(11): 5352-5357.
- [16] GAN Yu, CHENG Huanran, JIANG Haotian, et al. Research on the OFDR strain measurement method based on similar-

- ity features of dual-segment RSS[J]. Optics Express, 2024, 32(15): 26640–26652.
- [17] LI Shuai, JIANG Donghai, HUANG Wanpeng, et al. Strain measurement range extension of OFDR based on self-correcting 2-D cross correlation[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(14): 22397–22403.
- [18] YANG Ling, XING Tong, HUO Mengyuan, et al. Enhanced OFDR strain demodulation method based on optimized nearest neighbor sliding window threshold[J]. Optics Express, 2025, 33(26): 53788–53799.
- [19] BAI Qing, XUE Haoyang, HAO Bin, et al. Strain sensing range enhancement of OFDR using optimal spectral similarity pursuit method[J]. Optics & Laser Technology, 2026, 194: 114515.
- [20] QU Shuai, QIN Zengguang, XU Yanping, et al. Improvement of strain measurement range via image processing methods in OFDR system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(19): 6340–6347.
- [21] LI Pengfei, FU Cailing, DU Bin, et al. High-spatial-resolution strain sensor based on distance compensation and image wavelet denoising method in OFDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(19): 6334–6339.
- [22] AI Tenghua, LV Yuejuan, AI Ke, et al. OFDR High-performance distributed strain sensing system based on image filtering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(13): 52–60.
艾腾华, 吕悦娟, 艾珂, 等. 基于图像滤波的OFDR高性能分布式应变传感系统[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(13): 52–60.
- [23] ZHAO Shiyuan, CUI Jiwen, WU Zhanjun, et al. Distributed fiber deformation measurement by high-accuracy phase detection in OFDR scheme[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 4101–4108.
- [24] DING Zhenyang, WANG Chenhuan, LIU Kun, et al. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: a review[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1072.
- [25] PAN Hao, QU Xinghua, SHI Chunzhao, et al. Precision evaluation method of measuring frequency modulated continuous wave laser distance[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(9): 090201.
- [26] LUO Mingming, LIU Jianfei, TANG Caijie, et al. 0.5 mm spatial resolution distributed fiber temperature and strain sensor with position-deviation compensation based on OFDR[J]. Optics Express, 2019, 27(24): 35823–35829.
- [27] FROGGATT M E, GIFFORD D K, KREGER S, et al. Characterization of polarization-maintaining fiber using high-sensitivity optical-frequency-domain reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(11): 4149–4154.
- [28] ZHAO Shiyuan, CUI Jiwen, WU Zhanjun, et al. Accuracy improvement in OFDR-based distributed sensing system by image processing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124: 105824.
- [29] YANG Jun, LIN Cuofu, ZOU Chen, et al. Advances in high-performance optical frequency domain distributed fiber optical measuring and sensing technology [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 74–97.
杨军, 林蹉富, 邹晨, 等. 高性能光频域分布式光纤测试与传感技术研究进展[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 74–97.
- [30] ZHANG Xuping, ZHANG Yixin, WANG Liang, et al. Current status and future of research and applications for distributed fiber optic sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 11–73.
张旭苹, 张益昕, 王亮, 等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 11–73.
- [31] QU Shuai, QIN Zengguang, XU Yanping, et al. High spatial resolution investigation of OFDR based on image denoising methods[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18871–18876.
- [32] SONG Jia, LI Wenhui, LU Ping, et al. Long-range high spatial resolution distributed temperature and strain sensing based on optical frequency-domain reflectometry[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(3): 1–8.

Strain Measurement Range Extension in OFDR Based on Sliding Window Optimization and Gaussian Filtering

MAO Tianyu¹, LI Qi¹, GAO Pufeng¹, FAN Qinggeng¹, WANG Xin¹, WU Beilei¹, LIU Yan¹,
ZHANG Jianyong¹, CHEN Desheng², WANG Muguang¹

(1 Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(2 School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In recent years, optical frequency domain reflectometry has been widely applied in structural health monitoring, aerospace engineering, and industrial inspection owing to its high spatial resolution, high sensitivity, and distributed strain measurement capability. These characteristics enable precise and continuous detection of structural deformation along optical fibers, making optical frequency domain reflectometry a promising technique for distributed sensing applications. In optical frequency domain

reflectometry-based distributed optical fiber sensing systems, the strain distribution along the fiber is typically demodulated through cross-correlation between the reference and measurement signals. However, under large-strain conditions, excessive fiber stretching leads to positional mismatch between the reference and measurement signals, resulting in spurious peaks in the cross-correlation function and consequently inaccurate strain demodulation. In addition, demodulation accuracy is influenced by several factors, including nonlinear tuning of the tunable laser source, correlation noise, detector intensity noise, and environmental vibration disturbances. As the spatial resolution increases, the number of data points involved in the cross-correlation decreases, leading to lower similarity between the reference and measurement signals and increased random noise, which further degrades strain demodulation accuracy. These issues collectively hinder the simultaneous realization of a large strain measurement range, high spatial resolution, and high demodulation accuracy in optical frequency domain reflectometry systems. To address these challenges, this paper proposes a strain measurement range extension method for optical frequency domain reflectometry based on sliding-window optimization and Gaussian filtering. The proposed method aims to extend the measurable strain range while maintaining high spatial resolution and improving demodulation accuracy. First, a sliding-window optimization strategy is employed to identify abnormal windows based on a decision criterion combining wavelength shift continuity and cross-correlation similarity. For these abnormal windows, a local adaptive search is conducted within the neighborhood of the reference window. Specifically, the reference window is incrementally shifted with a single-sample step, and the cross-correlation function is recalculated at each shifted position. The optimal matching position is determined according to the maximum cross-correlation peak criterion, thereby compensating for positional mismatch between the reference and measurement signals. This process significantly improves signal similarity and effectively suppresses spurious peaks in the cross-correlation results, thereby enhancing the robustness of strain demodulation under large-strain conditions. Furthermore, the one-dimensional cross-correlation results obtained from all sliding windows are reconstructed along the fiber length and arranged according to spatial position, forming a distribution of peak position, distance, and amplitude. By projecting this distribution onto the peak position-distance plane, a two-dimensional cross-correlation map is obtained, in which the horizontal axis represents the spatial position along the fiber, the vertical axis denotes the wavelength shift, and the color intensity indicates the peak amplitude. In this representation, spurious peaks appear as discrete noise components that can be effectively suppressed using Gaussian filtering, thereby improving the continuity and reliability of the correlation map. To validate the effectiveness of the proposed method, a distributed strain sensing experimental system based on optical frequency domain reflectometry is established. Experimental results demonstrate that, under a wavelength sweep range of 4.32 nm and a spatial resolution of 7.4 mm, the sliding-window optimization method extends the strain measurement range from 300 $\mu\epsilon$ to 600 $\mu\epsilon$ compared with the conventional position compensation method while reducing the strain root mean square error, mean absolute error, and standard deviation by 73.90%, 80.26%, and 72.62%, respectively. Furthermore, by combining sliding-window optimization with Gaussian filtering, abnormal values in the strain demodulation results are effectively eliminated, and the strain measurement range is extended to 1500 $\mu\epsilon$. Meanwhile, the root mean square error, mean absolute error, and standard deviation are further reduced by 98.72%, 97.12%, and 99.14%, respectively. The proposed method provides a novel demodulation scheme for extending the strain measurement range of optical frequency domain reflectometry systems while maintaining high spatial resolution, thereby broadening the application potential of optical frequency domain reflectometry and offering a practical solution for high-precision distributed optical fiber sensing.

Key words: Fiber optic sensing; Distributed strain sensing; Optical frequency domain reflectometry; Rayleigh scattering; Cross-correlation algorithm

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 280.4788

CSTR: 32255.14.gzxb20265508.0806003