

自适应量程的光频域反射光纤传感互相关算法

薛渊泽^{1,2**}, 王学锋^{1,2*}, 唐才杰^{1,2}, 高红春^{1,2}

¹北京航天控制仪器研究所, 北京 100854;

²北京光纤传感系统工程技术研究中心, 北京 100094

摘要 光频域反射(OFDR)技术是一种基于频域分析的光学检测技术,通过互相关算法可以实现高空间分辨率的分布式光纤温度、应变传感,在航天器、飞行器等的结构健康监测中具有重要的作用。普通互相关运算在 OFDR 光纤温度、应变传感解调算法中存在测量量程较小和计算量较大的问题,限制了 OFDR 的大量程应用和解调速率的提高。为此,提出一种自适应量程的互相关算法,该算法不仅有效增大了 OFDR 的温度、应变测量量程,同时提高了系统的解调效率。实验验证了算法的可行性,并测试了算法的运行时间,结果表明该算法可使解调效率提高为原来的 2.25 倍;实际测量了 20~500 °C 的大量程温度曲线,给出三次方曲线拟合,拟合残差 < 0.1 °C;在 $\pm 3000 \mu\epsilon$ 的范围内进行应变测试,测试误差 $\leq 5 \mu\epsilon$ 。

关键词 光纤光学; 光频域反射; 光纤分布式传感; 互相关; 温度传感; 应变传感

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306020

Cross-Correlation Algorithm of Optical Frequency Domain Reflectometry Sensing System Based on Adapted Range

Xue Yuanze^{1,2**}, Wang Xuefeng^{1,2*}, Tang Caijie^{1,2}, Gao Hongchun^{1,2}

¹Beijing Aerospace Control Device Institute, Beijing 100854, China;

²Beijing Engineering Research Center of Optical Fiber Sensing System, Beijing 100094, China

Abstract Optical frequency domain reflectometry (OFDR) is an optical detection technique based on frequency-domain analysis. It can achieve high-spatial-resolution distributed fiber temperature/strain sensing through a cross-correlation algorithm and has great application prospects in the structural health monitoring of spacecraft, flight vehicles, etc. Common cross-correlation algorithms have problems of small range and large amounts of computation in OFDR fiber temperature and strain sensing demodulation, which limits the large-range application of OFDR and the improvement of the demodulation rate. For this reason, a cross-correlation algorithm based on an adapted range was proposed. The algorithm not only improves the range of temperature and strain measurement but also enhances the demodulation efficiency of the system. Experimental results show the feasibility and efficiency of the proposed algorithm. The demodulation efficiency was increased by 2.25 times. The large-range temperature curve from 20 °C to 500 °C was measured, and the residual error of cubic curve fitting was less than 0.1 °C. The test error was no greater than 5 $\mu\epsilon$ in the strain range of $\pm 3000 \mu\epsilon$.

Key words fiber optics; optical frequency domain reflectometry; distributed fiber sensing; cross-correlation; temperature sensing; strain sensing

OCIS codes 060.2310; 060.3735; 060.3738

1 引言

光频域反射(OFDR)技术由 Eickhoff 等^[1]于

1981 年提出,起初用于通信系统的光纤链路检测,其原理为采用外差相干检测技术提取光纤中的瑞利散射信号,利用频谱分析法实现高空间分辨率的故

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-03-30; 录用日期: 2021-04-08

通信作者: *xuefeng_wang@sina.cn; **yuanze_xue@126.com

障检测。1998 年, Froggatt 等^[2] 提出将光纤瑞利散射等效为随机周期的弱反射光纤光栅的思想, 通过互相关运算实现了光纤任意位置处温度、应变的检测。基于 OFDR 技术的光纤温度、应变传感器可实现全分布式、高空间分辨率的传感测量, 在航天器、飞行器等的结构健康监测方面具有重要意义^[3-4]。

2006 年, Luna 公司 Kreger 等^[5] 采用基于光频域反射和互相关计算的分布式光纤传感系统实现了毫米空间分辨率下检测分辨率为 $1 \mu\epsilon$ 和 1°C 的应变、温度传感技术; 2011 年, 谢玮霖等^[6] 从理论上推导了激光线宽和光纤端面反射对相位噪声的影响, 并指出应尽可能避免链路中存在大的菲涅耳反射; 2012 年, Ding 等^[7] 采用 NUFFT 法对可调谐激光器 (Agilent 81600B) 进行非线性校正, 使 50 m 光纤末端的空间分辨率从 5 m 提高到了 5 cm; 2013 年, Zhou 等^[8] 将基于瑞利散射的 OFDR 和基于布里渊散射的 BOTDA 相结合, 使用两种技术同时对一根光纤进行温度、应变测量, 实现了温度、应变的解耦; 2017 年, 张超等^[9] 提出利用傅里叶插值法提高光谱分辨率的方法, 有效缩短了传感单元的长度, 提高了定位精度; 2018 年, Feng 等^[10] 提出了局部光谱匹配算法, 有效增大了应变的测试量程; 2019 年, 该课题组^[11] 提出基于连续小波变换的 OFDR 算法, 在相同空间分辨率下, 提高了温度、应变的测量精度; 同年, 章征林等^[12] 对基于光频域反射技术的分布式光纤传感器的应变传递规律进行研究, 建立了分布式光纤传感器应变传递的模型; 吴静红等^[13] 将光频域反射计用于混凝土裂缝的识别与监测中, 使定位裂缝空间分辨率达到了 1 cm。

基于 OFDR 的光纤温度、应变传感技术采用互

相关算法对光纤所受的温度、应变进行解算, 普通互相关算法在 OFDR 的解调算法中存在测量范围有限和计算量庞大的问题, 难以满足航空器、飞行器结构健康监测的宽量程、快速响应的需求^[14]。当温度、应变变化较大时, 较大的光谱偏移量降低了互相关前后光谱的相似度, 限制了系统的温度、应变测试量程; 大量的互相关计算使得系统的解算时间较长, 限制了系统的解调效率。针对现有解调算法存在的问题, 本文提出一种自适应量程的互相关算法, 该算法与系统量程相关联, 自动剔除不相关光谱成分, 可以实现大温度、应变的解调; 同时, 该算法仅对量程范围内的互相关点进行计算, 减少了互相关计算中的移位次数, 提高了系统解调效率。

2 基本原理

2.1 光频域反射分布式光纤传感系统基本原理

OFDR 分布式光纤温度、应变系统由窄线宽扫描激光器、信号检测光路、光电探测和信号采集处理四部分组成, 如图 1 所示, 其中 C1 为分光比为 90:10 的保偏光纤耦合器, C2 为分光比为 90:10 的单模光纤耦合器, C3、C4、C5 为分光比为 50:50 的保偏光纤耦合器, PBS 为光纤偏振分束器, BPD1、BPD2 为平衡光电探测器, PD 为光电探测器。扫描激光器发出的激光经过耦合器分别进入测量干涉仪和参考干涉仪, 参考干涉仪用于校正光源的非线性扫描, 采用重采样法将传感信号修正为等光波频率间隔采样^[15]; 为了抑制偏振衰落, 采用偏振分束器进行 s/p 偏振信号分集探测, 同时采用光平衡探测器进一步抑制了激光器的相对强度噪声。

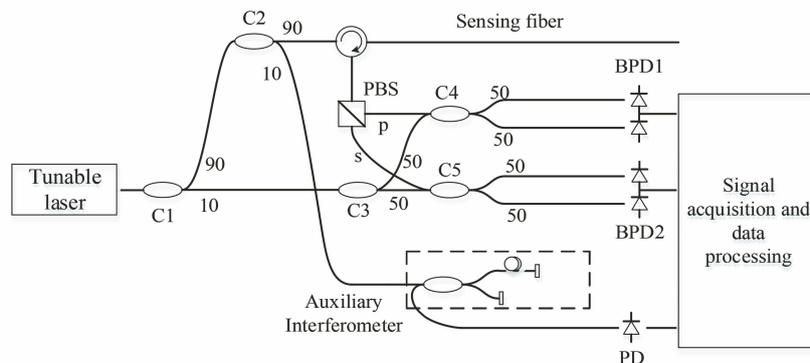


图 1 OFDR 分布式光纤温度/应变测量系统原理框图

Fig. 1 OFDR distributed optical fiber temperature/strain measurement system

基于 OFDR 系统的分布式光纤温度、应变传感解调算法步骤如下: 1) 通过参考干涉仪信号分别对

s/p 通道传感信号进行等频率间隔采样校正, 得到 s/p 重采样信号; 2) 对 s/p 重采样信号分别进行快

速傅里叶变换(FFT)计算,得到 s/p 偏振的频谱信息,并进行 s/p 偏振频谱对准;3)根据设置的空间分辨率大小,对 s/p 频谱进行滤波处理,对滤波后的信号进行快速傅里叶逆变换(IFFT)计算,得到光纤所有位置的瑞利散射信号;4)对测量得到的瑞利散射信号与参考瑞利散射信号进行互相关运算,得到光谱漂移量;5)根据光纤灵敏度系数完成温度、应变的计算。

2.2 互相关算法的原理

在信号处理领域,互相关函数用于描述两个信号在任意两个不同时刻取值的相关程度。对于离散的实数信号 y_1 和 y_2 ,互相关函数 R 可以表示为

$$R(m) = \sum_{n=0}^{N-1} y_1(n)y_2(n+m),$$

$$m = -(N-1), -N, \dots, -1, 0, 1, \dots, M-1, \quad (1)$$

其中, y_1 的元素个数是 N , y_2 的元素个数是 M 。从(1)式可以看出,相关运算从线性空间的角度来看是移位的内积运算,内积可以反映两个向量的相似程度,两个向量的最高相似程度对应互相关谱上的极大值。在 OFDR 解调算法中,由于光纤的散射信号在温度、应变作用下只进行波长的偏移,光谱形状不发生改变,因此互相关谱的极大值相对中心位置的偏移就代表了光谱的波长偏移量。

由于互相关函数与互功率谱函数互为傅里叶变换对,因此为了减少计算量,通常通过傅里叶变换/傅里叶逆变换的方法可以实现信号的互相关计算,即

$$R(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y_1^*(k)Y_2(k) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} km\right),$$

$$m = -(N-1), -N, \dots, -1, 0, 1, \dots, M-1, \quad (2)$$

其中 Y_1 和 Y_2 分别为 y_1 和 y_2 的离散傅里叶变换。

2.3 自适应量程的互相关算法

虽然通过傅里叶变换/傅里叶逆变换的方法可以使得互相关运算的效率得到提高,但是计算时需要两个序列的所有数据均参与运算,即使采用快速算法也存在较大的计算量。此外,在 OFDR 系统中,当光纤受到温度或应变作用时,测量散射光谱相对参考散射光谱会发生漂移,如图 2 所示(示意图,非实测数据)。根据文献[10]的分析,在可调谐激光器(TLS)的扫描范围内出现的新光谱成分,会导致测量前后光谱相似度降低,降低了普通互相关信号的信噪比,限制了系统的温度、应变测试量程。

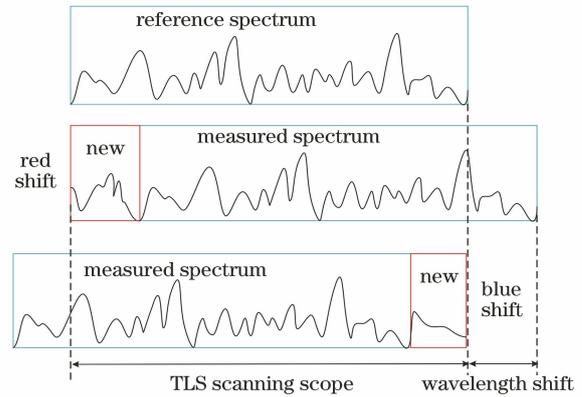


图 2 光谱漂移示意图

Fig. 2 Spectral drift diagram

为了解决上述问题,本文提出一种与测量量程相关联的互相关算法。根据系统设置的上下量程,剔除参考光谱 S 中可能漂移出去(相对于激光器扫描范围)的光谱成分,再与测量光谱 M' 作互相关运算,得到互相关向量 R ,其向量元为 $R(n)$,计算公式可表示为

$$R(n) = \sum_{j=0}^{\text{floor}[(I-H-L)/\Delta l]} S(j \cdot \Delta l + L)M'(n \cdot \Delta l + j \cdot \Delta l),$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, \text{floor}[(H+L)/\Delta l], \quad (3)$$

式中 I 为光谱总长度, L 为光谱偏移下量程, H 为光谱偏移上量程, Δl 为光谱采样间隔, $\text{floor}(\cdot)$ 为向下取整函数。

图 3 为算法的示意图(非实测数据)。根据量程设置,选取参考光谱的中间段,依次移位截取测量光谱中的等长区域进行内积运算,当移位至真正的测量光谱位置时,内积运算将得到最大值,互相关向量 R 的元素个数 n 由设置的量程和光谱采样间隔来决定。相对于传统的互相关运算,该方法通过剔除参考光谱中可能不相关的光谱成分,避免了新光谱成分出现导致的解调失效的问题,可以实现较大温度、应变的解算。同时根据系统的设置量程,本文方法仅需进行量程范围内的有效内积运算,即进行 $\text{floor}[(H+L)/\Delta l]$ 次的内积运算,而使用普通的互相关计算需要进行 $\text{floor}(2I/\Delta l - 1)$ 的内积运算,本文方法极大地减少了内积运算的次数,提高了系统的解调效率。

3 实验结果与分析

激光器波长扫描波段为 C 波段,实际扫描波长宽度为 42.3 nm,扫描速度为 50 nm/s,线宽为 2 MHz。首先测试了自适应量程的互相关算法的

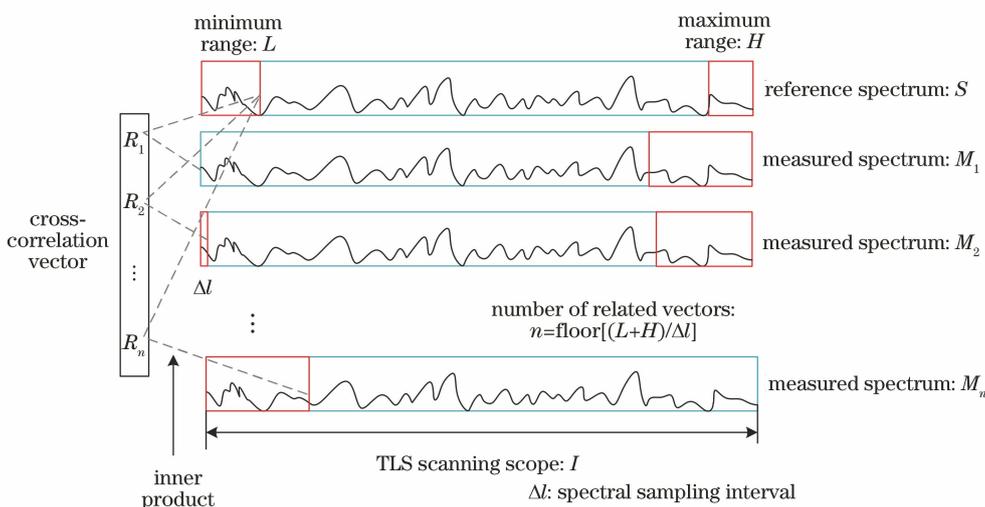


图 3 自适应量程互相关算法示意图

Fig. 3 Schematic illustration of cross-correlation algorithm based on adapted range

解调性能,对比了普通互相关算法(采用傅里叶变换/傅里叶逆变换的方法)和自适应量程的互相关算法用于 500 °C 高温传感时对于互相关谱的解算结果以及解调效率。然后对 25 m 单模光纤进行了 20~500 °C 的大量程温度测试和 ±3000 με 范围的应变测试。

3.1 自适应量程的互相关算法验证

对普通互相关算法和自适应量程的互相关算法进行大量程解调对比测试,将传感光纤从室温(约 20 °C)升温至 500 °C,两种互相关算法计算得到的互相关曲线如图 4 所示。互相关运算的光谱点数为 512,光谱采样间隔为 0.0827 nm,在自适应量程的

互相关算法中,系统设置的下量程为 -0.5 nm,上量程为 7.5 nm,根据算法原理,一共进行了 96 次的内积运算。根据自适应量程的互相关算法的解调结果,互相关谱峰的波长偏移量为 6.17 nm。根据图 4 的解调结果,可知普通互相关算法得到的互相关谱峰与噪声最大值基本相等,很难准确识别互相关峰的位置,而自适应量程的互相关算法得到的互相关谱峰比噪声最大值高出 54%,通过普通的寻峰算法可以准确识别谱峰。因此对于 500 °C 的高温温度传感,自适应量程的互相关算法可以有效地解调波长的偏移,而普通的互相关算法已无法满足该量程的传感应用。

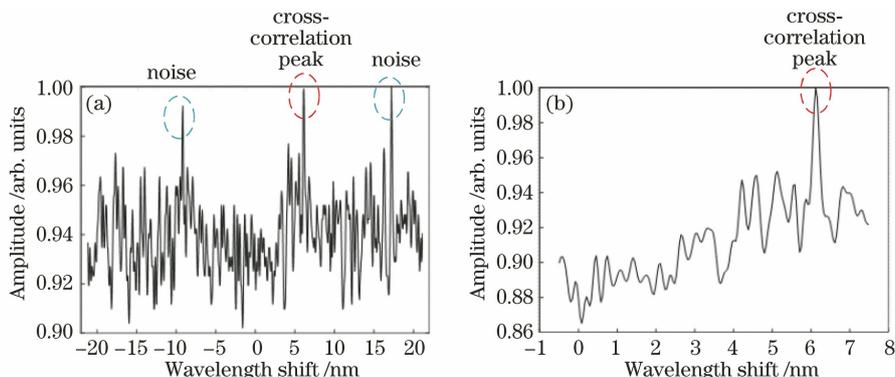


图 4 500 °C 温度传感的互相关结果。(a) 普通互相关;(b) 自适应量程的互相关

Fig. 4 Cross-correlation results of 500 °C temperature sensing. (a) Common correlation; (b) correlation based on adapted range

对普通互相关算法和自适应量程的互相关算法在不同量程设置下的波长偏移解算时间进行了统计,其中测点数目为 10000 个,共统计了 15 次的解算时间,统计结果如图 5 所示。其中,采用普通互相

关算法所用时间平均为 904.6 ms,而采用自适应量程互相关算法在量程设置为 6 nm 和 8 nm 时所用的时间平均为 383.2 ms 和 403.1 ms(运算平台为 MIO-5270 型单板计算机,Labview2017),采用自适

应量程的互相关算法使得解调效率提高为原来的 2.25 倍。

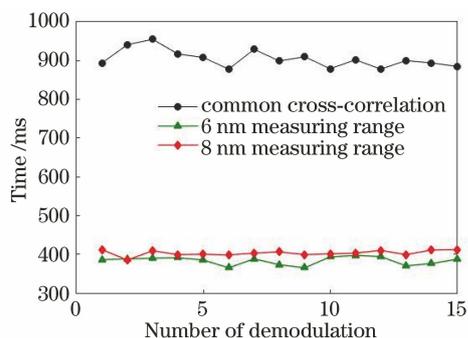


图 5 普通互相关算法和自适应量程互相关算法解调时间
Fig. 5 Demodulation time of common correlation algorithm and cross-correlation algorithm based on adapted range

3.2 温度传感实验

使用该系统对 25 m 单模光纤末端的 9 cm 光纤进行温度测试,将光纤置于石英管内,使其不受应力的影响,使用高精度铂电阻温度传感器和光纤传感器进行对比测试,其实验装置如图 6 所示。

选取 6 个测试温度点 20, 100, 200, 300, 400, 500 °C 进行测试,以 20.7 °C 时的散射光谱作为波长参考,系统测量得到的不同温度下波长偏移量随光纤长度的变化曲线如图 7(a)所示。选取与铂电阻温度计感温区域高度相同的光纤片段的光谱偏移量进行温度-波长曲线拟合。表 1 给出铂电阻测得的温度和 OFDR 传感系统测得的波长偏移变化量,对其进行三次方曲线拟合如图 7(b)所示,每个点的拟合残差均小于 0.1 °C。

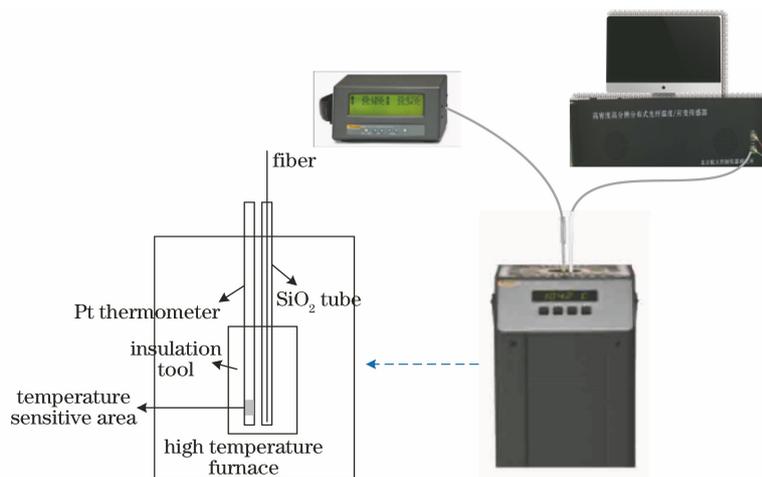


图 6 温度实验装置

Fig. 6 Temperature experiment device

表 1 温度测试结果

Table 1 Results of temperature test

Parameter	Value					
Temperature /°C	20.7	100.1	205.5	300.7	394.4	489.5
Wavelength shift /nm	0	0.814	2.053	3.331	4.68	6.03
Fitting residual /°C	0.01	0.0028	-0.06	-0.039	-0.082	-0.097

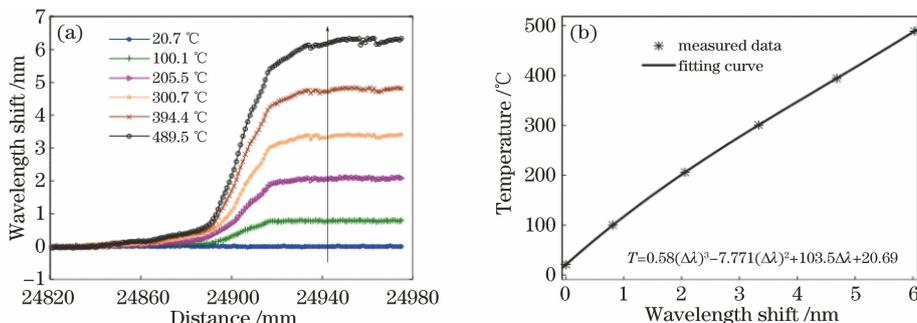


图 7 温度测试结果。(a)不同温度下波长偏移量随光纤长度的变化曲线;(b)温度-波长拟合曲线

Fig. 7 Results of temperature testing. (a) Wavelength offset change with fiber length at different temperatures; (b) temperature-wavelength fitting

3.3 应变传感实验

将单模光纤 23.5~24 m 中间的两段 3 cm 的光纤片段采用环氧树脂胶分别粘接在标准应变梁的

正反面中心位置处,采用四点等弯矩梁装置(应变产生精度优于 $3 \mu\epsilon$)对应变梁施加定量的应变值,实验装置如图 8 所示。

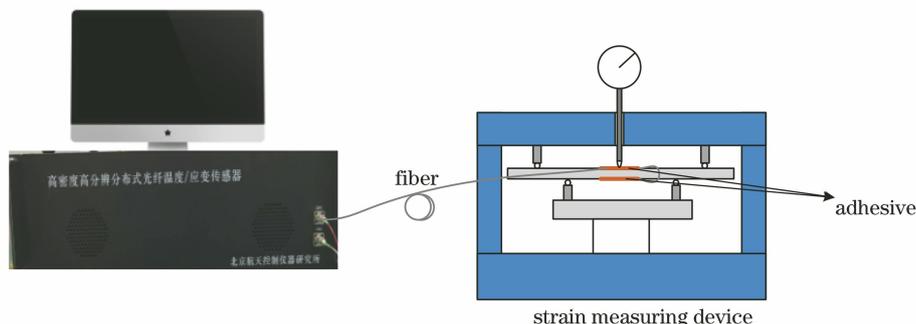


图 8 应变实验装置

Fig. 8 Strain experiment device

施加的应变分别为 0, ± 1000 , ± 2500 , $\pm 3000 \mu\epsilon$,根据光纤的应变系数 $0.784 \mu\epsilon^{-1}$,将波长偏移转换为应变变化量,得到光纤上的应力分布如图 9 所示。在两段粘接区域中心选取 1 cm 长的光纤所受的应变平均值与四点弯矩梁施加的标准应变进行比较,结果如表 2 所示,在 $\pm 3000 \mu\epsilon$ 以内,

最大应变测试误差 $\leq 5 \mu\epsilon$ 。

3.4 实验分析

本节对所提出的自适应量程的光频域反射分布式光纤传感互相关算法的解调时间、温度和应变测量量程及精度进行了实验验证。表 3 对比了近年来报道的不同 OFDR 解调算法实现的测量量程和解调时间。文献[9]中采用傅里叶插值法有效提高了波长分辨率,但是没有增大温度和应变的测量范围,也没有缩短解调时间;文献[10]采用局部光谱相似性、文献[16]采用光谱匹配和空间对准的方法,有效增大了应变测量量程,但文中算法未提高系统的解调效率;本文提出的自适应量程的互相关算法在有效增大系统的温度、应变测试量程的基础上,有效提高了解调效率,实验结果表明,系统的温度测量范围为 $20\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变测量范围为 $\pm 3000 \mu\epsilon$,8 nm 量程的解调时间为 403.1 ms。

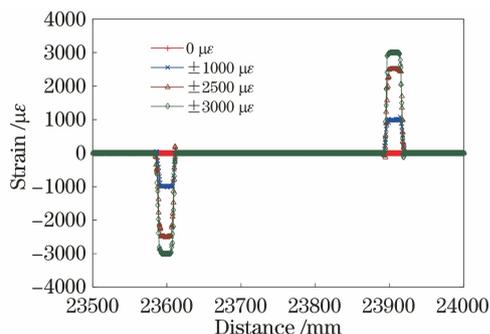


图 9 应变测试曲线

Fig. 9 Strain testing curves

表 2 应变测试结果

Table 2 Results of strain test

unit: $\mu\epsilon$

Parameter	Value						
Standard strain	-3000	-2500	-1000	0	1000	2500	3000
Output strain of OFDR strain sensing system	-3002	-2495	-996	-0.2	997	2504	3003
Measurement error	-2	5	4	0.2	-3	4	3

表 3 不同解调算法实现的测量量程和解调时间对比

Table 3 Comparison of measurement range and demodulation time realized by different demodulation algorithms

Core technology	Temperature/ strain range	Demodulation time /ms	Number of measuring points
Fourier interpolation method ^[9]	$25\sim 60 \text{ }^\circ\text{C} / \pm 1200 \mu\epsilon$		
Local similar characteristic ^[10]	$3000 \mu\epsilon$		
Spectrum registration and spatial calibration ^[16]	$7000 \mu\epsilon$	1060	5000
Correlation based on adapted range	$20\sim 500 \text{ }^\circ\text{C} / \pm 3000 \mu\epsilon$	403.1 (measuring range: 8 nm)	10000

4 结 论

开展了 OFDR 分布式光纤温度、应变测试系统中互相关算法的研究,提出一种量程自适应互相关算法。根据系统设置的量程,通过剔除不相关光谱成分,可以增大系统的量程,通过减少互相关计算中的移位次数,可以提高系统的解调效率。实验结果表明,量程自适应互相关算法可使解调效率提高为原来的 2.25 倍。开展了基于 OFDR 的分布式光纤温度测试和应变测试,给出了沿光纤分布的温度、应变测试曲线,并实现了残差 $<0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的三次方温度曲线拟合,以及测量误差 $\leq 5\text{ }\mu\text{e}$ 的应变测试结果。该解调算法有效增大了 OFDR 系统的测量量程,提高了解调速率,但是目前该算法是在计算机上使用 Labview 编程来实现的,后续将采用现场可编程门阵列(FPGA)、数字信号处理器(DSP)等嵌入式系统,进一步提高系统的解调速率和可靠性。

参 考 文 献

- [1] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency-domain reflectometry in single-mode fibers[C]//Optical Fiber Communication Conference 1981, April 27-29, 1981, San Francisco, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 1981: WF3.
- [2] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. Applied Optics, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [3] Wada D C, Igawa H, Tamayama M, et al. Flight demonstration of aircraft fuselage and bulkhead monitoring using optical fiber distributed sensing system[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(2): 025014.
- [4] Sun G, Bai H J, Shi Y L, et al. Research progress and application of optical frequency domain reflectometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050007.
孙良,白浩杰,石玉伦,等.光频域反射计的研究进展及应用[J].激光与光电子学进展,2020,57(5): 050007.
- [5] Kreger S T, Gifford D K, Froggatt M E, et al. High resolution distributed strain or temperature measurements in single-and multi-mode fiber using swept-wavelength interferometry[C]//Optical Fiber Sensor 2006, October 23-27, 2006, Cancun, Mexico. Washington, D.C.: OSA, 2006: ThE42.
- [6] Xie W L, Dong Y, Zhou Q, et al. Phase noise analysis of optical frequency domain reflectometry [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0706003.
谢玮霖,董毅,周潜,等.光频域反射技术中激光相位噪声影响分析[J].光学学报,2011,31(7): 0706003.
- [7] Ding Z Y, Liu T G, Meng Z, et al. Note: improving spatial resolution of optical frequency-domain reflectometry against frequency tuning nonlinearity using non-uniform fast Fourier transform[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(6): 066110.
- [8] Zhou D P, Li W, Chen L, et al. Distributed temperature and strain discrimination with stimulated Brillouin scattering and Rayleigh backscatter in an optical fiber [J]. Sensors (Basel), 2013, 13(2): 1836-1845.
- [9] Zhang C, Yang N, Bao Y, et al. Spectral resolution improvement technique for optical frequency-domain reflectometry-based optical fiber distributed sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0806001.
张超,杨楠,包艳,等.基于光频域反射计的光纤分布式传感中光谱分辨率提升技术[J].光学学报,2017,37(8): 0806001.
- [10] Feng K P, Cui J W, Jiang D, 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] Feng K P, Cui J W, Dang H, et al. A OFDR signal processing method based on wavelet transform for improving its sensing performance [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(13): 1108-1111.
- [12] Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, et al. Strain transfer law of distributed optical fiber sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0410001.
章征林,高磊,孙阳阳,等.分布式光纤传感器应变传递规律研究[J].中国激光,2019,46(4): 0410001.
- [13] Wu J H, Liu H, Yang P, et al. Identification and monitoring of concrete cracks based on optical frequency domain reflectometry technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 241201.
吴静红,刘浩,杨鹏,等.基于光频域反射计技术的混凝土裂缝识别与监测[J].激光与光电子学进展,2019,56(24): 241201.
- [14] Wu J H, Wang G, Liu J. Establishment and simulation analysis of temperature field model of aeroengine high temperature cavity [J]. Navigation and Control, 2019, 18(5): 8, 107-112.
武锦辉,王高,刘吉.航发高温内腔温度场模型的建立与仿真分析[J].导航与控制,2019,18(5): 8,

107-112.

- [15] Song J, Li W H, Lu P, 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.
- [16] Zhao S Y, Cui J W, Suo L J, et al. Performance investigation of OFDR sensing system with a wide strain measurement range[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(15): 3721-3727.