

基于光谱奇偶函数分解的光纤布拉格光栅峰值检测

陆祈祯, 丁朋, 黄俊斌*

海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033

摘要 提出一种采用光谱奇偶函数分解的光纤布拉格光栅(FBG)光谱峰值检测算法,并进行了实验验证。FBG 光谱是波长 λ 和光强 $P(\lambda)$ 的函数,沿 λ 轴逐点移动光谱,使光谱与 $P(\lambda)$ 轴相交;并将每个移动点下光谱分解的奇函数的最大值作为特征值。上述特征值的最小值所对应的 λ 即为 FBG 光谱的中心波长。采用非对称高斯函数叠加高斯白噪声建立 FBG 光谱理论模型;对 FBG 传感器依次施加线性递增的轴向拉力。然后使用所提算法计算理论模型和实验 FBG 光谱的中心波长,结果表明,与传统算法相比,该算法能够更快、更准确地检测出 FBG 光谱的中心波长。

关键词 测量; 光纤; 光纤布拉格光栅; 峰值检测算法; 奇偶分解

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0304009

Peak Detection of Fiber Bragg Grating Spectra Using Even-Odd Function for Spectral Decomposition

Lu Qizhen, Ding Peng, Huang Junbin*

Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract In this study, a peak detection algorithm based on an even-odd function to decompose fiber Bragg grating (FBG) spectra is proposed and experimentally demonstrated. An FBG spectrum is a function of wavelength λ and light intensity $P(\lambda)$, which is moved along the λ axis point-by-point and intersected with the $P(\lambda)$ axis. The maximum value of the odd function used for the FBG spectral decomposition under each moving point is defined as a characteristic value. The λ value corresponding to the minimum characteristic value is used as the central wavelength of the FBG spectrum. A theoretical model of the FBG spectrum is established using an asymmetric Gaussian model and additive white Gaussian noise superposition. Linearly increasing axial strain is imposed on an FBG sensor in turn. The central wavelengths of the theoretical model and experimental FBG spectra are calculated using the proposed algorithm. The results show that using proposed algorithm, the central wavelength of the FBG spectrum can be obtained more quickly and accurately than conventional algorithms.

Key words measurement; optical fiber; fiber Bragg grating; peak detection algorithm; even-odd decomposition

OCIS codes 120.4630; 280.4788; 060.3735; 060.4230; 150.1135

1 引言

基于波分复用的光纤布拉格光栅(FBG)传感器通过检测 FBG 光谱中心波长的变化,来探测温度、应变、位移、加速度等物理量^[1-3]。目前,检测 FBG 中心波长的算法大致分为以下几类:1)FBG 光谱最大值法,如直接峰值法、半峰值法、自适应阈值法^[4],但光谱的最大值容易受噪声影响。王巧妮等^[5]提出了利用 Steger 图像修正最大值的方法,对直接提取

的最大值进行进一步的修正,使得提取的 FBG 光谱中心波长的抗噪声能力得到增强。2)高斯函数法,如遗传算法^[6]、蚁群算法^[7]、神经网络算法^[8]、粒子群算法^[9],但该方法没有考虑 FBG 光谱的形状。陈勇等^[10-11]提出利用非对称高斯模型以及修正高斯模型来解决 FBG 光谱非对称的问题,使得提取的 FBG 中心波长的抗波形不对称能力得到增强。3)蒙特卡罗法,利用该方法能快速简单地计算 FBG 光谱的重心,但是精度不高。

收稿日期: 2019-09-25; 修回日期: 2019-10-10; 录用日期: 2019-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(11774432)、湖北省自然科学基金(2018CFB788)

* E-mail: tsyj98@163.com

在光纤陀螺研究领域,通常选择宽带光功率谱密度的重心作为光谱的中心波长^[12-14],并且认为沿着坐标轴横轴平移宽带光功率谱密度谱线使其重心位于纵轴上时,由功率谱密度分解的奇函数的最大值最小(与重心不在纵轴上时比较)^[14]。可以看出,重心移动到纵轴的步数与系列平移的功率谱密度奇函数最大值中的最小值是一一对应的关系。宽带光功率谱密度的波形与 FBG 光谱波形类似,均可用非对称高斯函数建立其对应模型。由此,本文提出通过寻找系列平移的 FBG 光谱奇函数最大值中的最小值,来确定 FBG 光谱的“重心”,并将其作为 FBG 的中心波长。利用该方法仿真计算得到的“重心”,与蒙特卡罗法计算得到的重心并不相同,并且非对称高斯函数的不对称性越强,两者的差别就越大。

本文采用非对称高斯函数叠加高斯白噪声建立 FBG 光谱理论模型。仿真结果表明,该算法的抗波形不对称能力优于蒙特卡罗算法和高斯模型算法,劣于非对称高斯模型算法;抗噪声能力优于蒙特卡罗算法和非对称高斯模型算法,劣于高斯模型算法。最后,将所提出的算法应用于 FBG 传感器位移测量。实验结果表明,该算法的均方根误差(RMSE)最小。此外,从复杂度来看,本文算法优于高斯模型算法和非对称高斯模型算法,而精度优于蒙特卡罗算法。

2 光谱奇偶函数分解原理与算法实现

2.1 原理

采用非对称高斯函数建立 FBG 光谱理论模型[见图 1(a)],模型表达式为

$$P(\lambda) = \begin{cases} \exp\left[-4\lg 2 \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\lambda_1}\right)^2\right], & \lambda \leq \lambda_B \\ \exp\left[-4\lg 2 \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\lambda_2}\right)^2\right], & \lambda \geq \lambda_B \end{cases}, \quad (1)$$

式中: λ_B 为光谱最大值对应的波长; $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别为光谱最大值下降 3 dB 时左右两侧所对应的波长。 $P(\lambda)$ 沿横轴向左移动 $\Delta\lambda$,与 $P(\lambda)$ 纵轴相交,移动后的光谱 $P_c(\lambda)$ 如图 1(b)所示,函数表达式为

$$P_c(\lambda) = P(\Delta\lambda + \lambda). \quad (2)$$

对 $P_c(\lambda)$ 进行奇函数 $P_{co}(\lambda)$ 和偶函数 $P_{ce}(\lambda)$ 分解(见图 2),对应的函数表达式为

$$P_{ce}(\lambda) = P_{ce}(-\lambda) = \frac{P_c(\lambda) + P_c(-\lambda)}{2}, \quad (3)$$

$$P_{co}(\lambda) = -P_{co}(-\lambda) = \frac{P_c(\lambda) - P_c(-\lambda)}{2}. \quad (4)$$

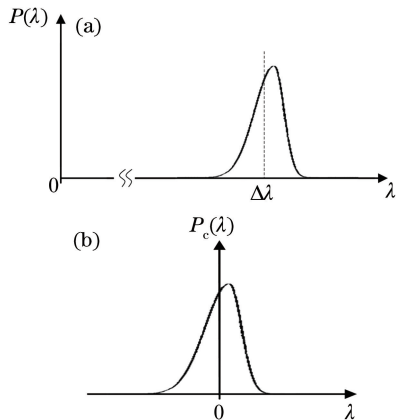


图 1 非对称高斯模型模拟的光谱。(a) $P(\lambda)$; (b) $P_c(\lambda)$
Fig. 1 Spectra simulated by asymmetrical Gaussian model. (a) $P(\lambda)$; (b) $P_c(\lambda)$

FBG 光谱是连续信号情况下的讨论如下。当 $P(\lambda)$ 沿横轴向左移动 $\Delta\lambda$ 时, $P(\lambda)$ 变为 $P_c(\lambda)$ 。 $P_{co}(\lambda_1)$ 、 $P_{co}(\lambda_2)$ 、 $P_{co}(\lambda_3)$ 和 $P_{co}(\lambda_4)$ 是 $P_{co}(\lambda)$ 函数的极值[见图 2(b)]。由图 2 可知,当系列平移的 FBG 光谱的奇函数最大值最小时,有 $P_{co}(\lambda_1) = -P_{co}(\lambda_2) = P_{co}(\lambda_3) = -P_{co}(\lambda_4) = P_{co_min}$ 。此时将平移量 $\Delta\lambda$ 命名为 $\bar{\lambda}$ 。证明如下:当 $\Delta\lambda$ 比 $\bar{\lambda}$ 稍大时, $P_{co}(\lambda_3) > P_{co_min}$;当 $\Delta\lambda$ 比 $\bar{\lambda}$ 稍小时, $P_{co}(\lambda_1) > P_{co_min}$ 。因此,只有当 $P_{co}(\lambda_1) = P_{co}(\lambda_3)$ 时,系列平移光谱的奇函数最大值才最小。

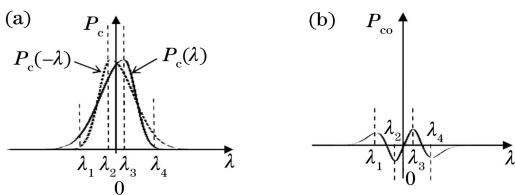


图 2 $P_c(\lambda)$ 函数曲线及其奇函数分解。
(a) $P_c(\lambda)$ 和 $P_c(-\lambda)$; (b) $P_{co}(\lambda)$

Fig. 2 Function curves of $P_c(\lambda)$ and odd function of its decomposition. (a) $P_c(\lambda)$ and $P_c(-\lambda)$; (b) $P_{co}(\lambda)$

FBG 光谱是离散信号情况时的讨论如下。 $P(\lambda_i)$ 被认为是在纵轴上,其中 i 取值为 1 到 N 。对应每个 $P(\lambda_i)$, $P_{co}(\lambda_i)$ 由 $P_c(\lambda_i) - P_c(-\lambda_i)$ 计算得到, $P_{co}(\lambda_i)$ 的最大值很容易得到,将其命名为 $P_{co}(\lambda_i)_{max}$ 。选择并定位 N 个 $P_{co}(\lambda_i)_{max}$ 中的最小值,并命名为 $P_{co}(\lambda_i)_{max_min}$ 。此时,对应于 $P_{co}(\lambda_i)_{max_min}$ 的 λ_i 即为所求的 FBG 光谱中心波长。

2.2 算法

在长度为 N 的 FBG 光谱信号 $x(n)$ 之前或之后补充不同数量的零,生成新的序列,使得 $x(n)$ 中的每个元素依次处于新序列的正中位置,以使沿 n

轴逐点移动 FBG 光谱时光谱可与 y 轴相交。然后对新序列进行反转、减法和最大值查找操作,从而检测出 FBG 的中心波长。计算程序详细说明如下:

步骤 1:平滑原始信号。本文使用五点平滑滤波方法。判断 $x(n)$ 的长度 N 是偶数还是奇数。设置循环变量 $i=1$ 。

步骤 2:如果 N 是偶数,则在 $x(n)$ 的前面补充 $N-2i+1$ 个零。新序列用 $y(a)$ 表示。反转 $y(a)$,新序列由 $y_f(a)$ 表示。求出 $y(a)-y_f(a)$ 中元素的最大值,用 $c(i)$ 表示。循环变量 i 自动加 1。

步骤 3:执行步骤 2,直到 $i > \frac{N}{2}$ 。可获得 $N/2$ 个 $c(i)$,由此构成序列 $c(b)$ 。设置 $i=1$ 。

步骤 2 和步骤 3 的原因如下:如图 3(a)所示, $x(i)$ 在 y 轴上, i 从 1 到 $N/2$ 。通过反转 $x(n)$ 获得 $x(-n)$ 。函数的奇函数分解可以通过 $x(n)-x(-n)$ 来实现(这里不需要执行操作“/2”)。但是 $x(n)$ 和 $x(-n)$ 的起始位置不一样,它们不能直接进行减法。因此,在 $x(n)$ 的前面补零,生成步骤 2 中的 $y(a)$,然后 $y(a)$ 和 $y(-a)$ 可以直接进行减法操作。

步骤 4:将 $2i-1$ 个零补充到 $x(n)$ 的后面。新序列用 $z(c)$ 表示,反转 $z(c)$,新序列用 $z_f(c)$ 表示。求出 $z(c)-z_f(c)$ 中元素的最大值,用 $d(i)$ 表示。循环变量 i 自动加 1。

步骤 5:执行步骤 4,直到 $i > \frac{N}{2}$ 。获得 $N/2$ 个 $d(i)$,并由这些数字构成序列 $d(b)$ 。

步骤 4 和 5 的原因与步骤 2 和 3 的原因相同

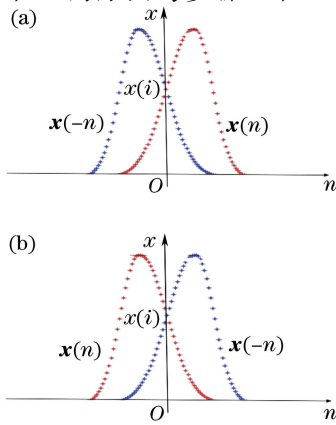


图 3 光谱信号 $x(n)$ 前后补零。(a) 当 $i < N/2$ 时,在 $x(n)$ 前补零;(b) 当 $i > N/2$ 时,在 $x(n)$ 后补零
Fig. 3 Zero filling before and after spectral signal $x(n)$.
(a) Before $x(n)$, when $i < N/2$; (b) behind $x(n)$, when $i > N/2$

[见图 3(b)]。

步骤 6:构成 $c(b)$ 和 $d(b)$ 的新序列,如 $[c(b) \ d(b)]$ 所示,并找到序列的最小元素 R 。对应于最小元素的波长 R_{index} 就是所求的中心波长。

同理, N 是奇数同样可以获得 FBG 光谱的中心波长,使用 MATLAB 语言的算法流程图如图 4 所示。

3 仿 真

3.1 FBG 光谱不对称度对中心波长的影响

选择 λ_B 为 1531.5 nm, n 变化范围为 1530.0 nm 至 1533.0 nm, 计算步长为 0.00025 nm, $\Delta\lambda_2$ 为 0.25 nm, $\Delta\lambda_1$ 依次选为 0.250, 0.265, 0.275, 0.300, 0.325, 0.350 nm(因此,高斯模型的不对称度为 0, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%)。

图 5 所示为由蒙特卡罗算法、高斯模型算法、非对称高斯模型算法和奇偶分解算法计算得出的非对称高斯模型的 FBG 光谱中心波长。由图 5 可知,非对称高斯模型的不对称度越大,每种算法计算出的中心波长与 1531.5 nm 间的距离就越大。蒙特卡罗算法计算的中心波长受波形变化的影响最大,非对称高斯算法影响最小。奇偶分解算法与高斯模型算法受波形变化影响的程度介于蒙特卡罗算法和非对称高斯模型算法之间。

另外,由图 5 可知蒙特卡罗算法得出的光谱重心和奇偶分解算法得出“重心”确实不同,尤其是光谱不对称度越强时,两者间的偏差就越大。

3.2 FBG 光谱噪声污染对中心波长的影响

λ_B 选择 1531.5 nm, n 变化范围为 1530.0 nm 至 1533.0 nm, 计算步长为 0.00025 nm, $\Delta\lambda_1$ 为 0.2750 nm, $\Delta\lambda_2$ 为 0.2500 nm。 $P(\lambda)$ 受加性高斯白噪声的影响,信噪比(SNR)依次选择为 0.5 dB、1.0 dB、5.0 dB、10.0 dB。每个 SNR 下的中心波长计算 5 次,以研究计算结果的稳定程度,结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,高斯模型算法计算得到的 RMSE 最小,非对称高斯模型算法和蒙特卡罗算法得到的 RMSE 处于同一水平。非对称高斯模型算法解决了波形不对称的问题,但光谱抗噪能力下降,原因是该算法在计算过程中需要提取 FBG 光谱的最大值,而最大值很容易受到噪声的影响。奇偶分解算法计算的 RMSE 小于蒙特卡罗和非对称高斯算法,大于高斯模型算法。综上,奇偶分解算法在抗噪声能力方面优于蒙特卡罗和非对称高斯模型算

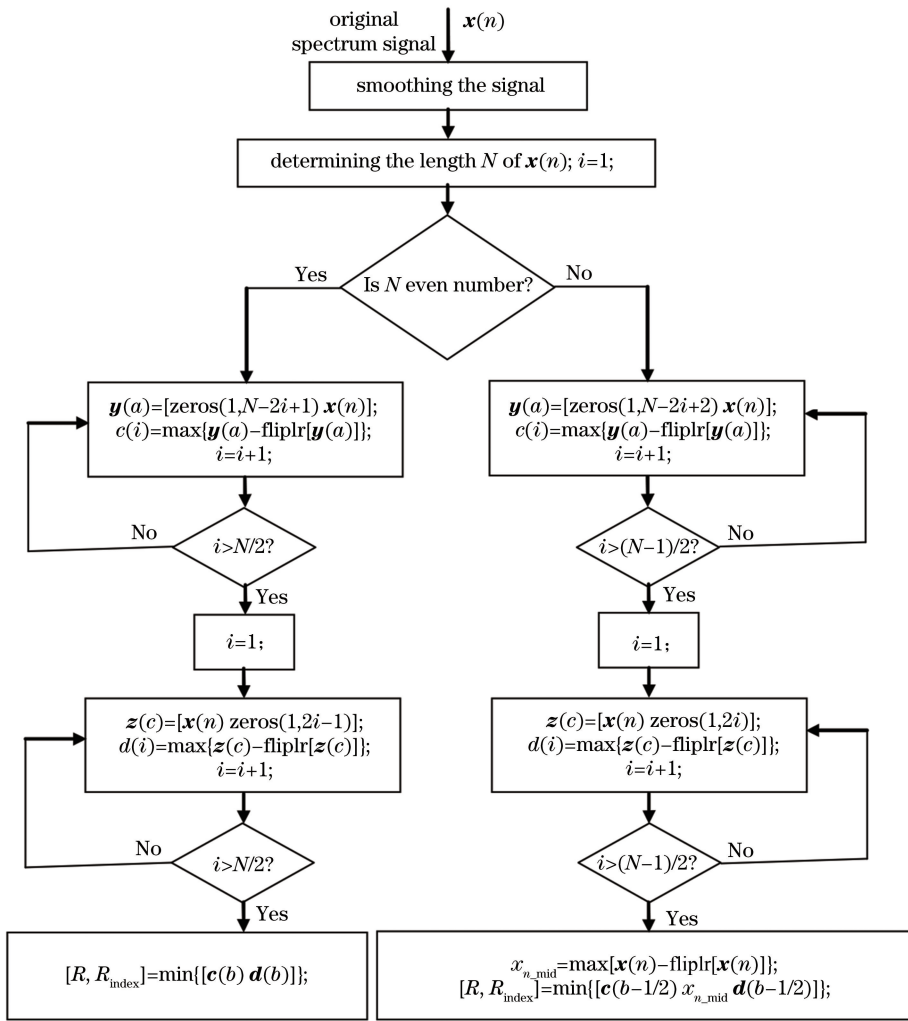


图 4 所提算法的流程图

Fig. 4 Flow chart of the proposed algorithm

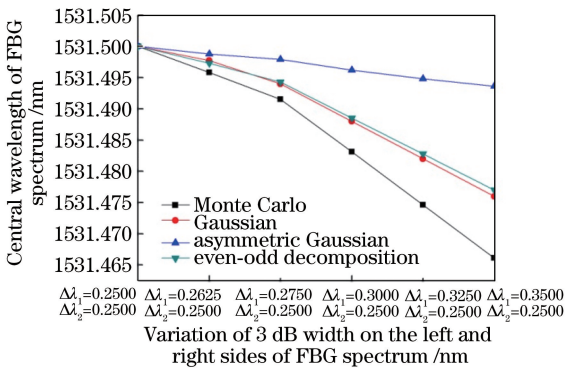


图 5 采用不同算法计算的非对称高斯模型的 FBG 光谱中心波长

Fig. 5 Central wavelengths of the FBG spectra of asymmetrical Gaussian models with different algorithms

法, 但比高斯算法差。

4 实 验

将 FBG 传感器的两端固定在调整架上。左边

为固定点, 右边为可调节点(见图 7)。两点之间的初始长度 L 为 25 cm。放大自发辐射(ASE)光源为自制光源, 可提供 C 波段光。光谱仪(OSA)型号为 Yokogawa AQ6370D(分辨率: 0.02 nm; sens/模式: high3; 取样间隔: 0.001 nm)。改变 L , 通过光谱仪记录 FBG 光谱。

L 的改变量 ΔL 依次取值 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 mm。采用不同算法计算每个 L 下的 FBG 光谱中心波长, 并进行线性拟合(见图 8)。线性拟合的残留值和 RMSE 如表 1 所示。由蒙特卡罗算法、高斯模型算法、非对称高斯模型算法和奇偶分解算法计算得出的 FBG 光谱中心波长线性拟合的 RMSE 分别为 0.010553, 0.009718, 0.008245, 0.005564 nm。蒙特卡罗算法简单, 计算精度不高, 与预期相同; 由于增加了修正计算, 非对称高斯算法的计算精度优于高斯算法; 而奇偶算法的 RMSE 最小, 在该实验中最适合用于提取 FBG 光谱的中心波长。

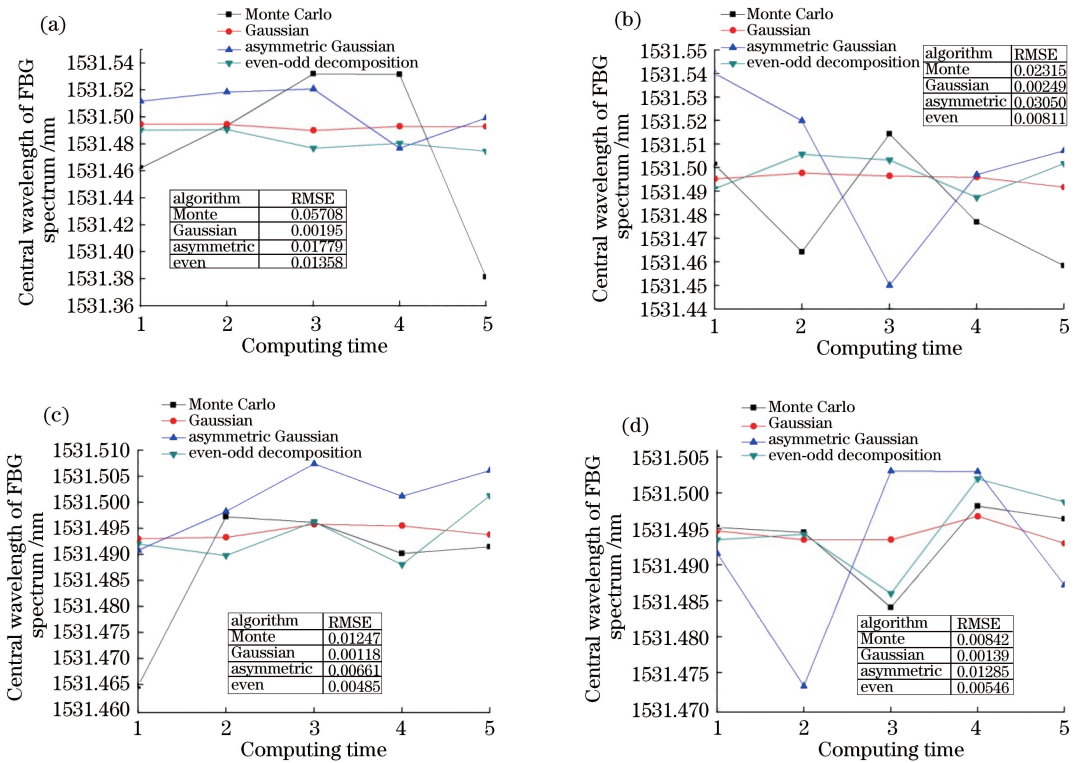


图 6 采用不同算法计算的不同 SNR 下的非对称高斯模型光谱中心波长。

(a) SNR:0.5 dB;(b) SNR:1.0 dB;(c) SNR:5.0 dB;(d) SNR:10.0 dB

Fig. 6 Central wavelengths of spectra of asymmetrical Gaussian model under different SNR

with different algorithms. (a) SNR: 0.5 dB; (b) SNR: 1.0 dB; (c) SNR: 5.0 dB; (d) SNR: 10.0 dB

表 1 各算法中心波长的残留值和 RMSE 值

Table 1 Residual value of central wavelength and RMSE value of each algorithm

| Algorithm | Residual value /nm | | | | | RMSE /nm |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|
| | $\Delta L=0$ mm | $\Delta L=0.25$ mm | $\Delta L=0.50$ mm | $\Delta L=0.75$ mm | $\Delta L=1.00$ mm | |
| Monte Carlo | -0.00120 | -0.00920 | 0.00880 | 0.0148 | -0.01320 | 0.010553 |
| Gaussian | -0.00143 | -0.00822 | 0.00848 | 0.01343 | -0.01226 | 0.009718 |
| Asymmetric | 0.00028 | -0.00845 | 0.00635 | 0.01155 | -0.00973 | 0.008245 |
| Even-odd | 0.00120 | -0.00660 | 0.00360 | 0.00780 | -0.00600 | 0.005564 |

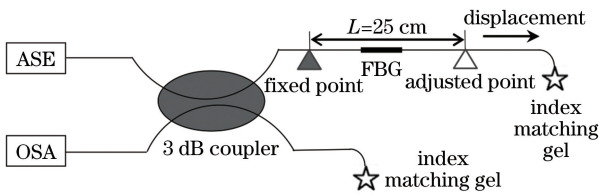


图 7 实验系统框图

Fig. 7 Block diagram of experimental system

5 结论

借鉴宽带光相干特性的研究方法,本文提出了一种检测 FBG 光谱中心波长的奇偶分解算法,并详细介绍了该算法的原理及实现方法。采用该算法与传统算法(蒙特卡罗算法、高斯模型算法和非对称高斯模型算法)计算非对称高斯模型的 FBG 光谱,并进行

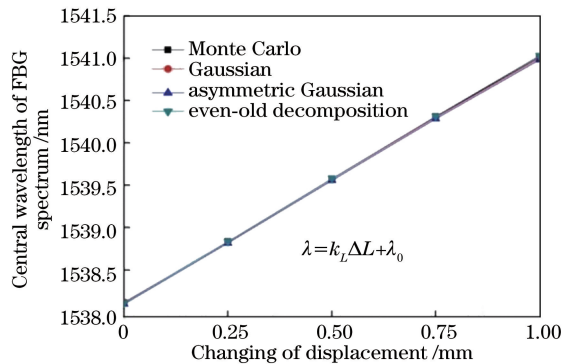


图 8 各算法的中心波长线性拟合结果

Fig. 8 Linear fitting results of central wavelengths by each algorithm

FBG 传感器线性位移实验。理论和实验结果表明,所提算法能快速有效地检测 FBG 光谱的中心波长。

参 考 文 献

- [1] Pei H F, Zhang S Q, Borana L, et al. Slope stability analysis based on real-time displacement measurements[J]. *Measurement*, 2019, 131: 686-693.
- [2] Bieler G, Werneck M M. A magnetostrictive-fiber Bragg grating sensor for induction motor health monitoring[J]. *Measurement*, 2018, 122: 117-127.
- [3] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328001.
廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328001.
- [4] Zhang W F, Li Y W, Jin B, et al. A fiber Bragg grating interrogation system with self-adaption threshold peak detection algorithm [J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1140.
- [5] 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.
- [6] Teng F C, Yin W W, Wu F, et al. Analysis of a FBG sensing system with transverse uniform press by using genetic algorithm[J]. *Optoelectronics Letters*, 2008, 4(2): 121-125.
- [7] Wu F, Kuang M M, Zhao J, et al. Application of ant colony algorithm in analyzing of traverse uniform strain reflective spectrum of fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 477-483.
吴飞, 邝敏敏, 赵静, 等. 蚁群算法在光纤布拉格光栅横向均匀受压反射谱分析中的应用[J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 477-483.
- [8] Negri L, Nied A, Kalinowski H, et al. Benchmark for peak detection algorithms in fiber Bragg grating interrogation and a new neural network for its performance improvement [J]. *Sensors*, 2011, 11(4): 3466-3482.
- [9] Zhang M, Zhang W, Zhang P, et al. Parameter optimization in particle swarm algorithm for spectral shape multiplexing demodulation of fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0706001.
张梅, 张伟, 章鹏, 等. 光纤光栅谱形复用解调中粒子群算法的参数优化 [J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0706001.
- [10] Chen Y, Yang K, Liu H L. A self-adaptive peak detection algorithm to process multi-peak fiber Bragg grating sensing signal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0805008.
陈勇, 杨凯, 刘焕淋. 多峰光纤布拉格光栅传感信号的自适应寻峰处理 [J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805008.
- [11] Chen Y, Yang K, Liu H L. Self-adaptive multi-peak detection algorithm for FBG sensing signal[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(8): 2658-2665.
- [12] Schuma R F, Killian K M. Superluminescent diode (SLD) wavelength control in high performance fiber optic gyroscopes [J]. *Proceedings of SPIE*, 1987, 719: 192-196.
- [13] Burns W K. *Optical fiber rotation sensing* [M]. Cambridge: Academic Press, 1994: 303-336.
- [14] Lefèvre H C. *The fiber-optic gyroscope* [M]. Fitzburg, MA: Artech House, 2014: 327-331.