

畸变光谱下光纤布拉格光栅传感网络 波长检测优化方法

江灏^{1,2,3}, 周清旭^{1,2}, 陈静^{1,2*}, 缪希仁^{1,2}

¹福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;

²福州大学电力系统与装置产业研究院, 福建 福州 350108;

³福建省医疗器械和医药技术重点实验室, 福建 福州 350108

摘要 针对光纤布拉格光栅(FBG)传感网络畸变光谱难以解调的问题,在超高斯光谱函数的基础上构造畸变光谱的理论函数,将畸变 FBG 传感网络光谱的解调问题转化为函数优化问题,提出了基于分布式估计算法的波长解调技术,并对已发生畸变的 FBG 传感网络进行解调实验。结果表明:分布式估计算法解调算法不仅能够保持较高的解调精度,其平均误差控制在 1 pm 以内,而且能够对光谱畸变的程度作出定量估计。与传统峰值检测解调技术相比,该方法解决了 FBG 传感网络畸变光谱波长难以解调的问题,为延长 FBG 传感网络使用寿命提供了新的途径,对提升 FBG 传感网络可靠性具有重要意义。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 畸变光谱; 波长解调; 分布式估计算法

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1006002

Wavelength Detection Optimization of Fiber Bragg Grating Sensing Networks Based on Distortion Spectrum

Jiang Hao^{1,2,3}, Zhou Qingxu^{1,2}, Chen Jing^{1,2*}, Miao Xiren^{1,2}

¹ College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University,
Fuzhou, Fujian 350108, China;

² Research Institute of Power System & Power Equipment, Fuzhou University,
Fuzhou, Fujian 350108, China;

³ Fujian Key Laboratory of Medical Instrumentation & Pharmaceutical Technology,
Fuzhou, Fujian 350108, China

Abstract To address the problem of difficulty in distortion spectrum demodulation of fiber Bragg grating (FBG) based sensing networks, we propose a wavelength demodulation technique based on estimation using a distribution algorithm (EDA). We construct a theoretical function of distortion spectrum based on the super Gaussian function and transform the wavelength detection problem of the distorted FBG sensing network into a function optimization problem. The proposed method is used to demodulate the distortion spectrum of a FBG sensing network through an experiment. The results denote that EDA can not only maintain an average detection accuracy within 1 pm even when the spectrum of FBG is distorted but also quantitatively estimate the distortion degree of FBG. When compared with the traditional peak detection methods, the proposed method can effectively identify the Bragg wavelength from a distortion spectrum. The proposed method provides a novel method to extend the service life and enhance the reliability of an FBG sensor network.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; distortion spectrum; wavelength demodulation; estimation of distribution algorithm

OCIS codes 060.3735; 280.4788; 060.4230; 150.1135

收稿日期: 2019-01-21; 修回日期: 2019-05-20; 录用日期: 2019-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(61703105, 61703106, 61773124)、福建省自然科学基金面上项目(2017J01500)、福建省教育厅中青年科研项目(JAT170107)、福建省高校青年自然科学基金重点项目(JZ160415)、福州大学引进人才科研启动项目(XRC-1623, XRC-17011)、福建省高校杰出青年科研人才计划(601934)

* E-mail: chenjing@fzu.edu.cn

1 引 言

光纤光栅(FBG)传感作为近年来迅速发展的一项新型传感技术,由于其具有抗电磁干扰、线性传感、便于复用组网等优点,被应用于多种工程领域的传感监测中,尤其在结构健康监测领域具有巨大的应用价值^[1-2]。FBG 传感网络通过分布式多点测量,对结构对象进行安全评估和损伤定位,实现长期服役过程的预警和诊断,为大型工程如桥梁大坝、土木建筑、电力系统等不同环境健康监测提供技术解决途径^[3-5]。

FBG 传感网络在结构健康监测系统中需要进行长期的信息监测,不可避免地会受到诸如环境温度、湿度、化学腐蚀等外界因素的冲击影响^[6-8]。虽然 FBG 具有较长的使用寿命,但是在长期的循环荷载和环境侵蚀的双重作用下,加上施工技术和结构设计的局限,FBG 传感器会出现不同程度的性能退化现象^[9]。Ang 等^[9]基于应力疲劳理论报道了长期处于应力载荷下,FBG 栅体结构会被破坏,导致 FBG 性能衰减和反射光谱畸变这一现象。Pal^[10]研究了不同类型 FBG 的长期热稳定性,证实高温环境下 FBG 将产生波长漂移、反射率不可逆变化等现象。吴俊等^[11]揭示了 FBG 调制深度的衰变机理,交变温度及应力会使 FBG 热稳定特性加速退化,使反射光谱无法识别。FBG 性能退化会出现不同程度的光谱畸变、光强衰减、光谱重叠等现象,这些退化光谱难以被解调,进而使 FBG 失去传感能力。因此,保证 FBG 传感网络在局部性能退化情况下能够正常工作的一种有效途径就是增强 FBG 传感网络对复杂畸变光谱的解调能力。张娅玲等^[12]针对 FBG 反射光谱波长缺失的现象,利用径向基函数(RBF)网络模型恢复数据方法避免了链路损耗对解调异常的影响。然而与光谱退化引起的异常相比,波长缺失更难辨识。目前异常光谱解调技术的研究尚处于起步阶段。文献[13]提出一种微结构法布里-珀罗干涉仪的 FBG 波长解调方法。文献[14-16]从优化角度对 FBG 光谱的重叠串扰问题进行了初步研究,采用差分进化算法解调两个串联 FBG 的重叠光谱,验证了利用进化计算方法可以得到较高解调精度的结论。文献[17-18]又进一步引入最小二乘支持向量回归机(LS-SVR)和极端学习机(ELM)算法研究重叠光谱解调模型的构建。文献[19]针对 FBG 重叠光谱的特点,采用峰值匹配分布式估计算法对反射光谱峰值进行重新匹配,避免了

FBG 峰值错配问题,提高了重叠光谱的解调精度。然而上述研究尚未考虑光谱畸变的情况,正常光谱和畸变光谱之间同样会产生串扰,畸变光谱还存在谱型的不对称性以及 FBG 性能退化的不确定性等问题。如何从混淆光谱数据解调出正确的测量结果是在性能退化下提升容错机制的难点所在。综合考虑 FBG 性能退化特性,提取光谱畸变特征,研究有效的自适应解调方法对于 FBG 传感网络容错研究具有十分重要的意义。

本文通过提取不同应变下的 FBG 传感器光谱信号,重点分析主瓣变宽、波形不对称以及光强变弱三种畸变的谱型特征。在超高斯光谱的基础上构造畸变光谱的理论函数,设计表征三种畸变特征的参数,完成对整个 FBG 传感网络光谱的模型重构,使之能够同时适用正常光谱与异常光谱。为实现对 FBG 传感网络畸变光谱的解调,从优化角度提出了一种基于分布式估计(EDA)算法^[20-21]的 FBG 传感网络波长解调技术,通过引入种群进化的概率模型评估候选解在空间的分布,再依据概率模型采样产生新的种群进行进化寻优。分布式估计算法在搜索策略上摒弃了遗传算法等较为盲目的种群进化过程,将更有助于解决 FBG 传感网络畸变光谱的解调问题。

2 FBG 传感网络畸变光谱解调模型

2.1 FBG 畸变反射光谱特征

典型的 FBG 传感网络如图 1 所示,宽带光源产生的入射光经过 3 dB 光耦合器及 $1 \times T$ (T 为光路数量)的分束器进入 FBG 阵列中,随后各 FBG 的反射光谱经过分束器和光耦合器进入光谱分析仪(OSA)等光谱采样设备,最后将采样数据送入计算机进行解调处理。FBG 传感网络在大型结构健康监测系统中由于受到外界因素冲击的影响,其部分 FBG 节点发生性能退化,其网络结构本身并不会发生改变,主要区别仅在于采样得到 FBG 的光谱发生了畸变。如图 1 中的光谱所示:实线表示正常光谱,虚线表示畸变光谱,可以发现,与正常光谱相比,畸变光谱的峰值位置和波形对称性都发生了改变。

如图 2 所示,因 FBG 性能退化而引起的光谱畸变可以大致分为 4 种类型:1)光谱的主峰展宽变大,导致峰顶变平,使得传统最大峰值检测算法的解调精度降低;2)光谱的中心波长向左或向右发生偏移,导致波形左右不对称,使得波长解调产生测量误差;3)光谱的光强变弱,导致中心波长峰值降低,当峰值

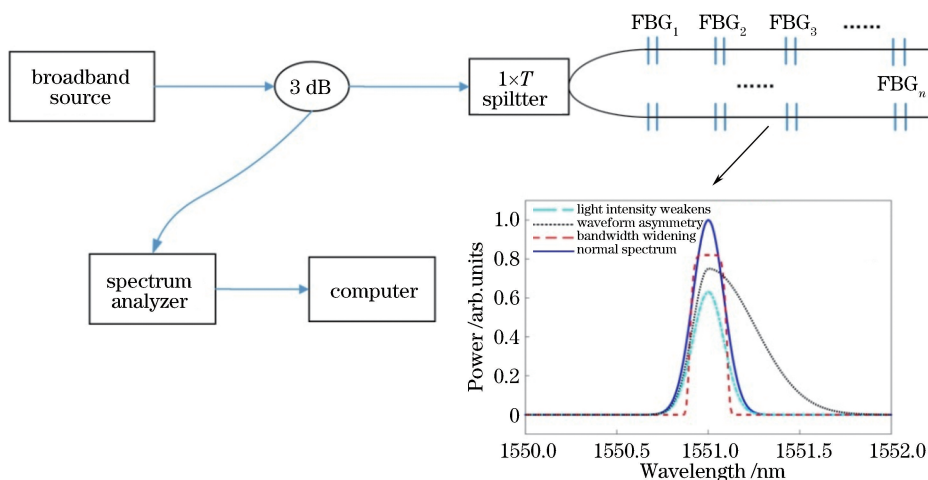


图 1 畸变 FBG 传感网络结构原理

Fig. 1 Structural schematic of distortion FBG sensing network

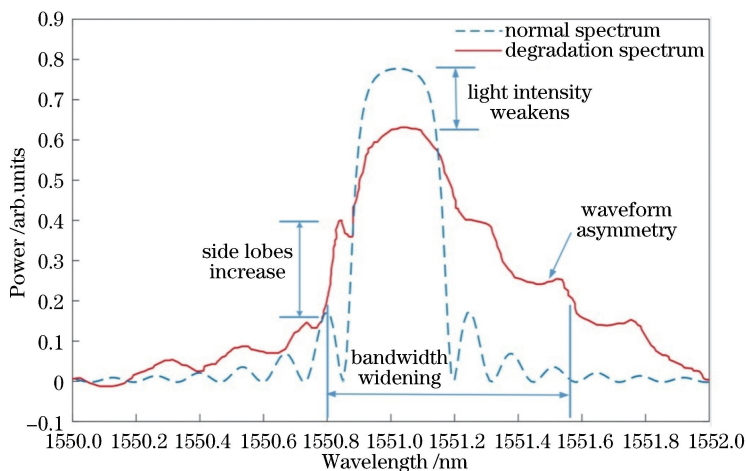


图 2 FBG 性能退化光谱

Fig. 2 FBG performance degradation spectrum

低于解调仪可检测阈值时,光谱中心波长将不能被识别;4)光谱的旁瓣峰值增高,当相邻两个工作区域的 FBG 光谱相互靠近时,旁瓣会发生叠加,产生附加峰,附加峰的高度超过解调阈值,将导致数据混淆。

光纤光栅传感系统中,单个 FBG 传感器的性能退化会导致复用 FBG 传感器时出现解调异常问题。在大型结构健康监测系统中,FBG 传感器通常以组网复用形式大规模埋嵌到结构中,若更换单个 FBG 传感器,不仅会破坏整体网络结构,甚至需要更换整条光缆,势必会造成巨大的经济损失^[22]。因此,畸变光谱的波长解调技术对于提升 FBG 传感网络的使用寿命具有显著意义。

2.2 畸变 FBG 传感网络解调优化模型

针对畸变 FBG 传感网络的波长解调问题,在超高斯光谱函数的基础上构造畸变光谱的理论函数 $g(\lambda, \lambda_B)$, 即

$$g(\lambda, \lambda_B) = \varepsilon I_r \begin{cases} \exp\left[-2^\tau \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\alpha \Delta \lambda_B}\right)^\tau\right], & \lambda \geq \lambda_B \\ \exp\left[-2^\tau \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta \lambda_B}\right)^\tau\right], & \lambda < \lambda_B \end{cases}, \quad (1)$$

式中: λ 为 FBG 波长范围内取得的间隔点值; λ_B 为中心波长; ε 为衰减因子; τ 为展宽参数; α 为波形不对称参数; $\Delta \lambda_B$ 为 FBG 的 3 dB 带宽, 理论值为 0.2 nm。

衰减因子 ε 用于衡量光强 I_r 的衰减影响, 反映了光谱衰减程度, 其值一般小于 1。 ε 的值越小, 说明光谱衰减越严重, 光谱峰值越低。当光谱衰减较大时, 光谱的中心波长将不能被识别, 通过调节 ε 能够控制光谱的衰减程度大小。 τ 展宽参数大于 0, τ 值越大主峰展宽越大, 反之亦然。通过调节 τ 可以控制光谱展宽大小。不对称参数 α 是大于 1 的常

数, α 值越大光谱波形左右差异越大, 波形不对称性越显著, 根据实际情况可知, 不同 α 的范围也不同, α 能够反映光谱波形不对称的差异程度。当 $\epsilon = 1$, $\tau = 2$, $\alpha = 1$ 时, (1) 式为正常光谱的理论函数。

在构造 FBG 数学模型基础上, 本研究将畸变 FBG 传感网络的波长解调问题转化为函数优化问题^[15]。假设一个由 n 个 FBG 构成的传感网络, $g_i(\lambda, \lambda_{Bi})$ 是单个 FBG 的反射谱函数, λ_{Bi} ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 是 FBG _{i} ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 的布拉格波长, 该参数为此次优化问题的决策变量。从 OSA 得到的采样光谱为 $r(\lambda)$, 其表达式为

$$r(\lambda) = \sum_{i=1}^n R_i g_i(\lambda, \lambda_{Bi}) + N_{\text{Noseie}}(\lambda), \quad (2)$$

式中: R_i 为 FBG _{i} ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 的反射峰值, 可通过衰减器调节; $N_{\text{Noseie}}(\lambda)$ 为系统噪声。

为解调出各 FBG 布拉格波长 λ_{Bi} ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 引入变量 s_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 来构造理论情况下 FBG 传感网络的反射光谱函数, s_i 为待解调的波长值, 具体表达为

$$r_v(\lambda, s, \epsilon, \tau, \alpha) = \sum_{i=1}^n R_i g_i(\lambda, s_i), \quad (3)$$

$$s \in \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\},$$

式中: s_i 的取值范围为 FBG _{i} ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 的工作范围; 衰减因子 ϵ_i 的取值范围为 $(0, 1]$; 展宽参数 τ_i 的取值范围为 $[2, +\infty]$ 中的偶数; 波形不对称参数 α_i 的取值范围为 $[1, +\infty]$ 。通过改变 $s_i, \epsilon_i, \tau_i, \alpha_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 的取值, 能得到该 FBG 传感网络所有可能组合的理论光谱。通过理论构造的光谱逼近实际采样光谱, 二者差异度可以用差异度函数来表征, 即

$$D(s) = \int_0^{+\infty} |r_v(\lambda, s, \epsilon, \tau, \alpha) - r(\lambda)| d\lambda. \quad (4)$$

于是, 波长检测问题转化为寻求最优的畸变参数值与波长变量 s 使函数 $D(s)$ 取得最小值的问题, 即理论光谱尽可能与实际采样光谱保持一致。通过求解(4)式的最小值问题即可获得各 FBG 相应的布拉格波长值, 同时辨识出相应的畸变参数值, 实现对畸变 FBG 传感网络的解调。完整解调优化模型可表述为

$$\min D(s) = \int_0^{+\infty} |r_v(\lambda, s, \epsilon, \tau, \alpha) - r(\lambda)| d\lambda,$$

$$s_i \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}], \epsilon_i \in (0, 1], \tau_i \in [2, 4, 6, \dots],$$

$$\alpha_i \in [1, +\infty), \quad (5)$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ 分别为宽带光源光谱的上下限。引入分布式估计算法对该优化模型进

行求解, 可实现对畸变 FBG 传感网络畸变光谱的高精度解调。

3 分布式估计波长解调算法

分布式估计算法是一种基于概率推演的进化计算算法, 通过引入概率模型来评估候选解在整个解空间中的分布, 然后依据概率模型采样产生新的种群, 如此反复进行, 实现种群进化。分布式估计算法利用概率模型表示待求变量之间的相互关系, 因此在解决高维、非线性、变量耦合等优化问题上更具有效性。畸变 FBG 传感网络的优化模型中种群个体由波长值和畸变参数值构成, 在初始化种群中选择优势个体通过学习得到概率模型。将优势个体中的波长与畸变参数放在一起, 通过学习得到个体分布的概率模型。依靠概率模型采样分别生成新的波长值和畸变参数值, 波长值和畸变参数值组合生成新的种群。依次反复, 直至满足终止条件退出迭代。分布式估计算法为应对畸变 FBG 传感网络解搜索空间过大的问题, 将种群个体维数划分成多个部分, 通过不同的概率模型进行种群进化, 大大降低了解调难度, 从而可以获得更高的解调精度。

基于分布式估计算法的畸变 FBG 传感网络解调过程主要环节包括: 初始化种群、选择优势个体、学习概率模型和采样生成新种群, 具体步骤如图 3 所示。

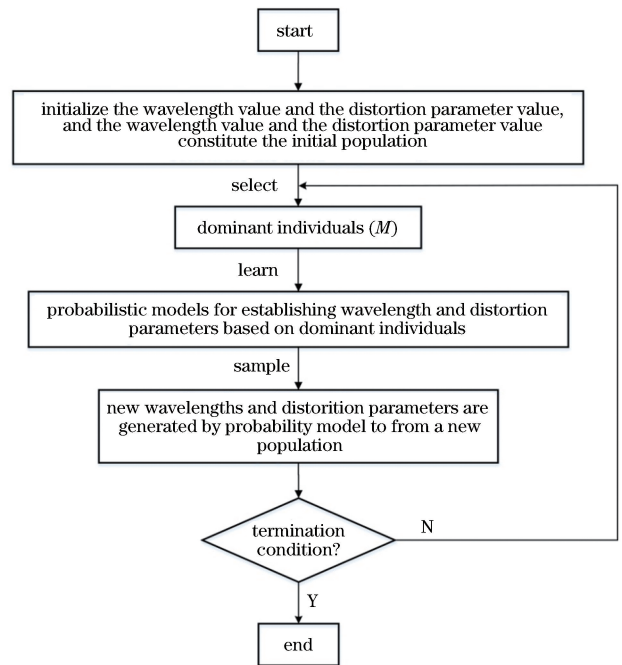


图 3 分布式估计算法流程图

Fig. 3 Flow chart of estimation of distribution algorithm

Step1: 据各 FBG 的工作带宽和光谱畸变程度分别确定波长和畸变参数的取值范围, 各个 FBG 的波长和畸变参数的取值范围构成解的搜索空间。在搜索空间内随机生成初始种群, 用 p^0 表示, 种群个数为 N 。

Step2: (4) 式为目标评价函数, 将种群中的每个个体代入目标评价函数中, 计算种群中的每个个体适应值大小。按照适应值从大到小的顺序对种群进行排序, 并从中选取前 $M (M \leq N)$ 个优势个体。

Step3: 采用高斯混合模型的学习方法对 M 个优势个体进行学习, 得到 M 个个体在种群的概率分布模型 $p(x)$ 。 M 个优势个体通过聚类算法被分成 l 个集群, 每个集群由高斯模型表示, 概率分布模型是由多个高斯概率密度的加权和构成。高斯混合模型^[23] 表达为

$$P(x) = \sum_{b=1}^l \frac{p_b}{\sqrt{2\pi}\sigma_b} \exp[-(x - \mu_b)/\sigma_b^2], \quad (6)$$

式中: x 为优势个体值, 表示每个集群在 l 个集群之中出现的概率; μ_b, σ_b 分别表示第 b 个集群的高斯模型的均值和标准差。

Step4: 由概率模型采样产生 N 个后代的种群, 计算 N 个后代的适应值。为了保留目前发现的最佳个体和赋予种群新的进化潜力, 采用精英主义思想从后代种群、选择优势个体以及父代种群中生成由 N 个个体组成的新种群, 记为 p^1 。

Step5: 满足终止条件进入停止状态, 否则返回 Step2。终止条件一般为设定的最大迭代次数, 可得最终的畸变 FBG 传感网络解调结果。

4 实验结果

依据图 1 所示原理图进行仿真和实验。首先选择具有三种典型畸变光谱(光强衰减、波形不对称、展宽变宽)的 FBG 进行解调, 验证在 FBG 发生畸变情况下, 分布式估计算法能够解调出波长值; 然后对畸变 FBG 施加不同的应力来检测其波长值的变化, 验证畸变 FBG 在不同应力状态下, 分布式估计算法依然能够解调出波长值; 为进一步验证在 FBG 发生多种畸变情况下算法的有效性, 实验采用多个畸变 FBG 进行光谱解调, 并讨论了不同数量规模的畸变 FBG 网络的解调精度和解调时间; 最后, 将本文提出的方法与现有文献中传统的峰值检测方法的实验结果进行对比。

实验所用宽带光源的半峰全宽(FWHM)为 50 nm, 功率为 30 μ W。光谱分析仪的采样范围为

1550~1552 nm, 采样带宽为 2 nm, 采样数为 200 点, 采样间隔为 10 pm。各 FBG 的工作范围为 1550~1552 nm, 在 FBG 阵列中使用可调衰减器使得各 FBG 具有不同的峰值反射率。其中变应力实验通过改变施加在 FBG 上的应力, 形成实验所需的实际光谱数据, 由光谱分析仪采集并直接送入计算机(CPU:i7 处理器, 2.4 GHz; 内存 4G)处理。分布式估计算法的参数设置如下: 种群数 N 为 100, 选择数 M 为 10, 采样数 N_s 为 90, 算法的最大迭代次数为 100 次。仿真光谱数据和理论光谱由(1)式的超高斯函数产生, 并在仿真光谱数据中加入 30 dB 的高斯白噪声。各组实验以均方根误差(RMS)对解调精度进行评估, 即

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda'_i)^2}, \quad (7)$$

式中: λ_i 为布拉格波长的测量值; λ'_i 为其实际值; n 为网络中的 FBG 数量。用 RMS 值衡量整个 FBG 传感网络光谱数据的测量误差。

4.1 典型畸变光谱的解调实验

本研究首先进行 FBG 典型畸变光谱解调的验证实验。实验选取 6 个 FBG, 其中: 三个 FBG 光谱正常, 波长值为 1550.50 nm; 另外三个 FBG 光谱发生畸变, 三个畸变光谱分别以一种典型畸变为主, 波长值为 1551.50 nm。根据图 2 所示的原理图, 一个正常 FBG 与一个畸变 FBG 组成 2-FBG 的传感网络, 正常和畸变光谱形成对比。

分布式估计算法解调的光谱结果如图 4 所示。每个图的左侧是正常 FBG 的光谱, 右侧是畸变 FBG 的光谱。(a)组实验中的畸变光谱特征以光强衰减为主, 其解调出的波长值分别为 1550.5010 nm 和 1551.4991 nm, 辨识出的畸变参数值如下: 衰减因子为 0.43、展宽参数为 4、波形不对称参数为 1.20。(b)组实验中的畸变光谱特征以展宽变宽为主, 其解调出的波长值分别为 1550.4998 nm 和 1551.4999 nm, 辨识出的畸变参数值如下: 衰减因子为 0.88、展宽参数为 8、波形不对称参数为 1.05。(c)组实验中的畸变光谱特征以波形不对称为主, 其解调出的波长值分别为 1550.4999 nm 和 1551.4990 nm, 辨识出的畸变参数值如下: 衰减因子为 0.76、展宽参数为 4、波形不对称参数为 3.33。三组实验的结果误差 RMS 值分别为 0.94, 0.15, 0.72 pm, 并且实验解调的光谱与实际采样的光谱几乎完全拟合, 说明分布式估计算法不仅能够完成正常光谱的解调, 而且能够高精度地解调出各种畸变 FBG 的波长值。

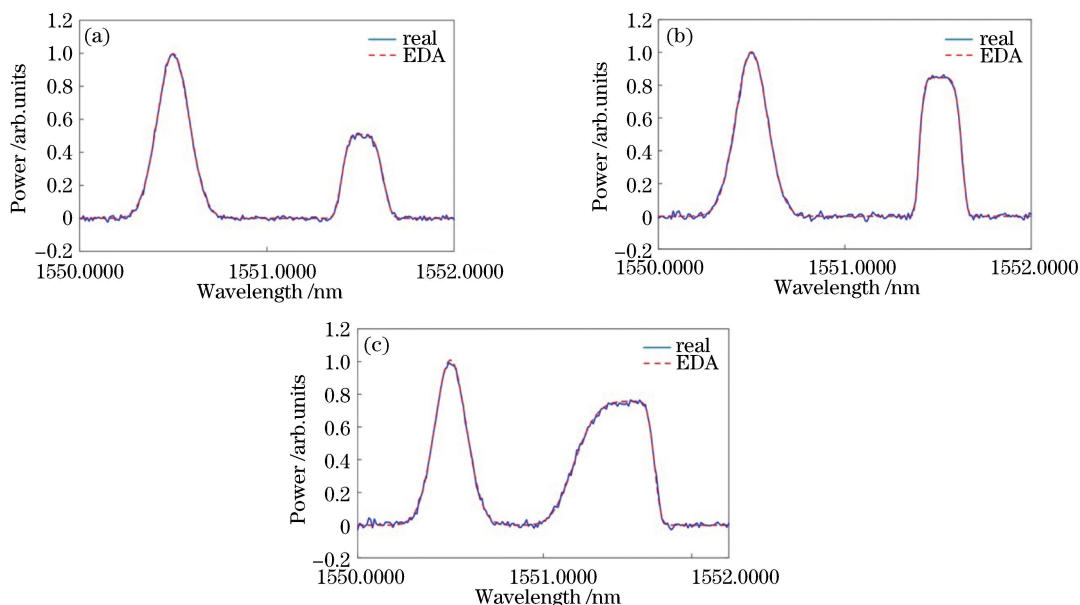


图 4 FBG 不同类型畸变的解调结果。(a)光强衰减;(b)展宽变宽;(c)波形不对称

Fig. 4 Demodulation results of different types of distortion of FBG. (a) Light intensity attenuation; (b) spectral broadening; (c) spectral asymmetry

4.2 FBG 传感网络变应力解调实验

本部分进行 2-FBG 传感网络在变应力条件下的测量实验。实验选取两个 FBG 的工作区域同为 1550~1552 nm。其中 FBG1 的光谱波形正常,中心波长值为 1550.23 nm。FBG2 通过温度交变箱加速光谱波形退化,得到存在三种典型畸变的光谱波形,中心波长值仍为 1551.77 nm。对正常的 FBG1 逐步施加增量为 $30 \mu\epsilon$ 的应力;对畸变的 FBG2 逐步施加减量为 $30 \mu\epsilon$ 的应力,共计 20 步。通过分布式估计算法解调得到的结果如图 5 所示,FBG1 的中心布拉格波长值从 1550.23 nm 逐步增加到 1550.80 nm,FBG2 的中心布拉格波长值从

1551.77 nm 逐步减小到 1551.20 nm,两个 FBG 的解调结果曲线完全符合应力变化的线性关系。20 组实验辨识出的三个畸变参数值如下:衰减系数值在 0.6 附近,展宽参数值在 4 附近,波形不对称值在 3 附近。20 组实验畸变参数值的平均值分别为 0.60、4.00 和 3.00,20 组实验的平均误差仅为 0.20 pm,最大误差 RMS 不超过 0.60 pm。畸变 FBG 在受到不同应力环境时,如同正常 FBG 一样,分布式估计算法依然能够高精度解调出畸变 FBG 的波长值。

4.3 FBG 传感网络随机畸变解调实验

为了进一步证明分布式估计算法在不同畸变情

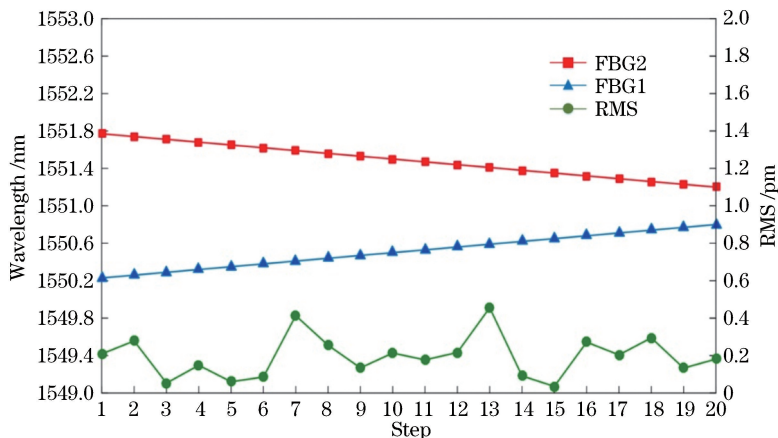


图 5 应力变化条件下两个 FBG 波长变化和 RMS

Fig. 5 Wavelength changes of two FBGs and RMS under different strains

况下的有效性,本部分测试了多种随机畸变光谱的 FBG 传感网络解调实验。在上述同样的实验配置下,实验采用 60 个 FBG 进行实验,每个 FBG 的光谱的畸变情况各不相同。其中 30 个 FBG 的波长值为 1550.50 nm。另外 30 个 FBG 的波长值为 1551.50 nm。选取两个不同波长的 FBG 组成 2-FBG 的传感网络,一共 30 组,每组实验采用分布式估计算法重复计算 20 次,最终取 20 次计算的平均结果作为解调结果。

图 6 分别给出了辨识出的 30 组衰减因子值、展宽参数值、波形不对称参数值和 RMS 值,各图中的实线和虚线分别表示两个 FBG 的解调结果。

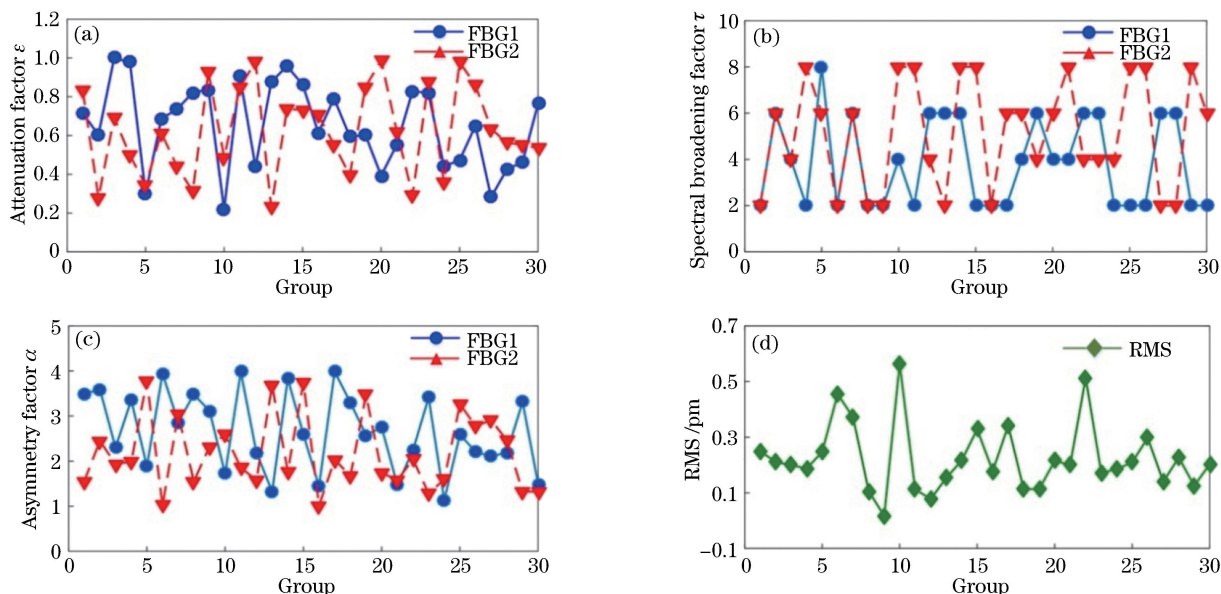


图 6 随机畸变 FBG 传感网络的畸变参数计算值和波长误差值。(a)衰减因子值;(b)展宽系数值;(c)波形不对称参数值;(d) RMS

Fig. 6 Distortion parameters and RMS of FBG sensing network under random distortion. (a) Attenuation factor; (b) spectral broadening factor; (c) asymmetry factor; (d) RMS

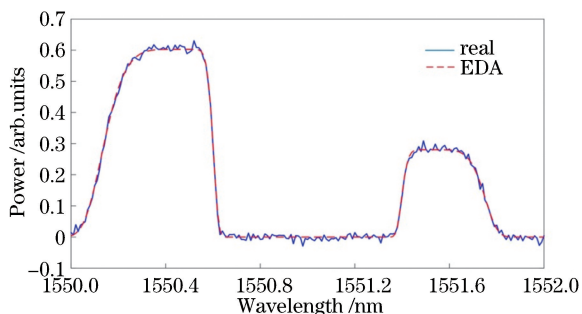


图 7 畸变 FBG 传感网络的实际光谱和理论光谱

Fig. 7 Actual and theoretical spectra of distorted FBG sensing network

4.4 不同数量 FBG 传感网络解调实验

为了验证分布式估计算法针对不同数量规模的

由图可知每组 FBG 畸变参数各不相同,同时每组中的两个 FBG 的畸变参数值也是各不相同的,30 组实验就有 60 种不同的畸变光谱,这 60 种畸变基本包含 FBG 可能发生的各种畸变类型。从 30 组中选取 1 组结果,如图 7 所示。虽然两个 FBG 光谱发生光强衰减、展宽变宽和波形不对称等畸变,但是两个光谱畸变依然具有一定的差异性。实验解调的光谱与实际采样的光谱拟合度很高,30 组实验平均误差为 0.22 pm,最大误差为 0.56 pm,RMS 的标准差为 0.12 pm。实验表明分布式估计算法能够针对多种不同退化程度的 FBG 畸变光谱实现波长检测。

FBG 传感网络的解调性能,分别进行了 2-FBG、4-FBG、8-FBG、10-FBG、20-FBG 以及 30-FBG 传感网络的解调实验。考虑到随着 FBG 数量的增加,采样光谱的数据量与 FBG 带宽成正比。为了减小算法的搜索空间,提高解调速率,采用工作区域光谱分割方法,即将待测光谱依据 FBG 的工作区域对每两个 FBG 进行分割,两两进行解调运算。解调结果如图 8 所示,随着 FBG 数量的增加,测量精度有所下降,但依然保持在较高的精度水平,30 个 FBG 的平均测量误差也仅为 0.61 pm。由于采用光谱分割法,测量时间与 FBG 数量成正比。2-FBG 网络解调时间仅为 0.34 s,随着 FBG 数量的增加,整个光谱的单次计算时间成比例递增。后续可在下位机上并行

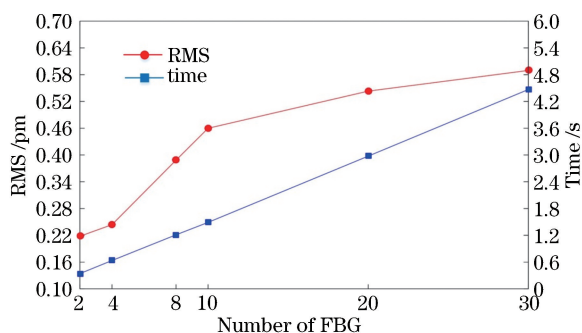


图 8 不同数量 FBG 传感网络的解调误差和解调时间

Fig. 8 Demodulation error and demodulation time of FBG sensing networks with different numbers of FBG

计算以减少大规模 FBG 传感网络解调的运算时间。

4.5 算法对比实验

最后将本文提出的分布式估计解调算法与现有传统的峰值检测方法对比,分别对比了最大法、质心法、高斯法、二阶多项式拟合法。在同样实验条件下,用不同方法分别进行 30 组实验,计算每组实验的解调误差。实验结果采用四分位图进行统计分析,如图 9 所示:二阶多项式拟合法解调的 30 组误差结果中最大值接近 4.0、最小值接近 2.3、下位数和上位数在 2.5~3.5 之间;高斯法解调的 30 组误差结果中最大值接近 2.8、最小值接近 2.5、下位数和上位数在 2.5~2.8 之间;质心法解调的 30 组实验误差中最大值接近 2.2、最小值接近 1.5、下位数和上位数在 1.7~2.1 之间;最大值法解调的 30 组误差结果中最大值接近 2.0、最小值接近 0.5、下位数和上位数在 1.0~1.7 之间;分布式估计算法解调的 30 组误差中最大值接近 0.8、最小值接近 -1.0、下位数和上位数在 -1.0~-0.5 之间。实验结果表明 4 种传统峰值检测方法的解调误差较大,难以精确解调出畸变光谱的波长值,而分布式估计算法的解调误差较小,能够实现畸变光谱高精度的解调效果。

30 组实验误差的平均误差如表 1 所示,其中:二阶多项式拟合法的平均误差为 2614.44 pm;高斯法为 392.59 pm;质心法为 89.70 pm;最大值法为 35.88 pm;分布式估计算法为 0.22 pm。在拟合原理上,二阶多项式拟合法通过二元一次函数对光谱曲线拟合获得波长;高斯法通过高斯函数对光谱拟合获得波长值;质心法通过权重计算获得波长值;最大法通过寻峰获得波长值。但对畸变 FBG 而言,波形不对称和展宽变宽使得曲线拟合变得很难实现,而光强衰减和展宽变宽又会使计算权重和寻峰方法变得不准确。实验结果表明,在畸变 FBG 中由于光谱波形发生波形不对称、展宽变宽和光强衰减等情

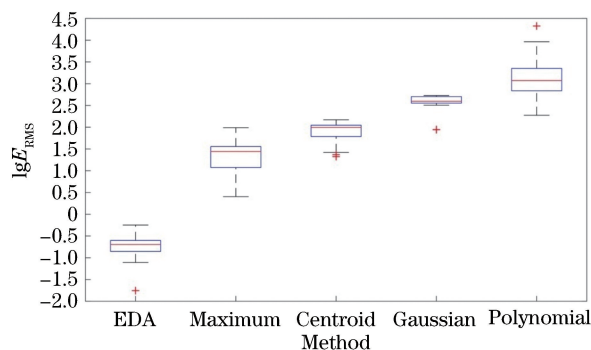


图 9 30 组实验的 EDA 和四种传统峰值检测方法误差对比四分位图

Fig. 9 Quartile graph of RMS of EDA and four peak detection methods for 30 experiments

况,因而传统的峰值检测法在其波长检测中失去有效性,但分布式估计算法通过函数寻优能够有效避免上述问题,对 FBG 传感网络的畸变光谱能够达到更加优越的解调性能。

表 1 30 组实验的 EDA 和四种传统峰值检测方法的平均误差

Table 1 Average error of EDA and four peak detection methods for 30 experiments

Method	EDA	Maximum	Centroid	Gaussian	Polynomial
Average error /pm	0.22	35.88	89.70	392.59	2614.44

5 结 论

针对畸变 FBG 传感网络的波长解调问题,提出了一种基于分布式估计算法的解调技术,通过构造并求解畸变 FBG 传感网络解调优化模型,进而得到各个 FBG 的布拉格波长。实验结果表明:分布式估计算法不仅能够完成正常光谱的解调,而且在受到不同应力环境时,依然能够高精度地解调出各种畸变 FBG 的波长值;对于光谱发生多种不同畸变的 FBG 传感网络,其解调误差也不超过 1 pm。该方法解决了传统峰值检测技术对于畸变光谱无法有效解调的问题,并保持了较高的解调性能。因此,本文提出的分布式估计解调技术对提升 FBG 传感网络使用寿命、扩大 FBG 传感器的实际工程应用具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Qiu Y, Wang Q B, Zhao H T, *et al.* Review on composite structural health monitoring based on fiber Bragg grating sensing principle [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2013, 18 (2): 129-139.

- [2] Xu G Q, Xiong D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. Chinese Optics, 2013, 6(3): 306-317.
徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 306-317.
- [3] Reynders E, Wursten G, de Roeck G. Output-only structural health monitoring in changing environmental conditions by means of nonlinear system identification [J]. Structural Health Monitoring, 2014, 13(1): 82-93.
- [4] Tian S Z, Qiu W C, Wen K, *et al.* Application research on FBG sensor in the monitoring of fracture and damage[J]. Laser Technology, 2017, 41(1): 129-132.
田石柱, 邱伟宸, 温科, 等. FBG 传感器关于裂缝及损伤的监测应用研究[J]. 激光技术, 2017, 41(1): 129-132.
- [5] Zhang X P, Wu J L, Shan Y Y, *et al.* On-line monitoring of power transmission lines in smart grid based on distributed optical fiber sensing technology [J]. Optoelectronic Technology, 2017, 37(4): 221-229.
张旭莘, 武剑灵, 单媛媛, 等. 基于分布式光纤传感技术的智能电网输电线路在线监测[J]. 光电技术, 2017, 37(4): 221-229.
- [6] Jia D G, Zhang Y L, Chen Z T, *et al.* A self-healing passive fiber Bragg grating sensor network [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(10): 2062-2067.
- [7] Zhang X L, Wang P, Liang D K, *et al.* A soft self-repairing for FBG sensor network in SHM system based on PSO-SVR model reconstruction[J]. Optics Communications, 2015, 343: 38-46.
- [8] Zhang J, Zeng J, Wang B, *et al.* The research on optic fiber FBG corrosion sensor based on the analysis of the spectral characteristics [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(3): 853-856.
张俊, 曾捷, 王博, 等. 基于光谱特征分析的光纤光栅腐蚀传感器研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(3): 853-856.
- [9] Ang J, Li H C H, Herszberg I, *et al.* Tensile fatigue properties of fibre Bragg grating optical fibre sensors[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(4): 762-768.
- [10] Pal S. Characterization of thermal (in)stability and temperature-dependence of type-I and type-IIA Bragg gratings written in B-Ge co-doped fiber [J]. Optics Communications, 2006, 262(1): 68-76.
- [11] Wu J, Chen W M, Zhang Y L, *et al.* Affect mechanism and experimental research on performance degeneration of FBG under the action of alternate temperature test [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(9): 1301-1305.
吴俊, 陈伟民, 张娅玲, 等. 交替温度对 FBG 性能蜕化的影响机理及试验研究[J]. 光电子 • 激光, 2010, 21(9): 1301-1305.
- [12] Zhang Y L, Chen W M, Zhang P, *et al.* Research of abnormal demodulation on multiplex FBG sensors [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2009, 7(3): 25-28.
张娅玲, 陈伟民, 章鹏, 等. FBG 传感器复用解调异常的研究[J]. 光学与光电技术, 2009, 7(3): 25-28.
- [13] Wang L Q, Miao C Y, Zhang C. Demodulation method of fiber Bragg grating pulse wave based on micro-structure Fabry-Perot interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1004002.
王丽清, 苗长云, 张诚. 基于微结构法布里-珀罗干涉仪的光纤光栅脉搏波解调方法[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1004002.
- [14] Jiang H, Chen J, Liu T D, *et al.* Design of an FBG sensor network based on Pareto multi-objective optimization [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(15): 1450-1453.
- [15] Jiang H, Chen J, Liu T D, *et al.* A novel wavelength detection technique of overlapping spectra in the serial WDM FBG sensor network[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 198: 31-34.
- [16] Jiang H, Chen J, Liu T D. Multi-objective design of an FBG sensor network using an improved Strength Pareto Evolutionary Algorithm [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 220: 230-236.
- [17] Chen J, Jiang H, Liu T D, *et al.* Wavelength detection in FBG sensor networks using least squares support vector regression [J]. Journal of Optics, 2014, 16(4): 045402.
- [18] Jiang H, Chen J, Liu T D. Wavelength detection in spectrally overlapped FBG sensor network using extreme learning machine [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(20): 2031-2034.
- [19] Chen J, Lin Y T, Zhou Q X, *et al.* Wavelength demodulation of a spectrally overlapped fiber Bragg grating sensor network based on peak match estimation of distribution algorithm [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 0406002.
陈静, 林雅婷, 周清旭, 等. 基于峰值匹配分布式估计算法的光纤布拉格光栅传感网络重叠光谱的波长解调[J]. 光子学报, 2019, 48(4): 0406002.
- [20] Yang Q, Chen W N, Li Y, *et al.* Multimodal estimation of distribution algorithms [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(3): 636-650.
- [21] Wang S Y, Wang L, Fang C, *et al.* Advances in estimation of distribution algorithms[J]. Control and

Decision, 2012, 27(7): 961-966, 974.

王圣尧, 王凌, 方晨, 等. 分布估计算法研究进展 [J]. 控制与决策, 2012, 27(7): 961-966, 974.

- [22] Kirikera G R, Balogun O, Krishnaswamy S. Adaptive fiber Bragg grating sensor network for structural health monitoring: applications to impact monitoring [J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10(1): 5-16.

- [23] Yu J J, Zheng Y J, Ruan X G, *et al.* Parameter optimization of trajectory imitation learning characterization based on Gaussian mixture model [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(5): 719-728.

于建均, 郑逸加, 阮晓钢, 等. 基于高斯混合模型的轨迹模仿学习表征参数优化 [J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(5): 719-728.