

改进光纤光栅应变分布解调算法中优化目标函数的理论与方法

张伟*, 苏超乾, 张梅, 雷小华, 章鹏, 陈伟民**

重庆大学光电工程学院教育部重点实验室, 重庆 400044

摘要 分析了光纤布拉格光栅(FBG)反射光谱的获取方式,根据反射光谱的特征,提出了利用相关系数改进 FBG 应变分布解调算法中优化目标函数的理论方法。结合差分进化算法,对改进算法与传统算法的性能进行了对比仿真。仿真结果表明,传统算法仅适用于能获知 FBG 真实反射率的情况,而改进算法还适用于无法获知 FBG 真实反射率的情况,所提方法提升了 FBG 应变分布解调算法的实际应用能力。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 非均匀应变分布; 差分进化; 解调

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0206002

Theory and Method for Improving Optimization Objective Function in Demodulation Algorithm of Fiber Bragg Grating Strain Distribution

Zhang Wei*, Su Chaoqian, Zhang Mei, Lei Xiaohua, Zhang Peng, Chen Weimin**

*Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems of Ministry of Education,
College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*

Abstract The obtainment method of fiber Bragg grating (FBG) reflection spectra is analyzed, and according to the characteristics of reflection spectra, a theoretical method is proposed for improving the optimization objective functions in the demodulation algorithm of FBG strain distributions using correlation coefficients. The performances of improved and traditional algorithms are compared by simulation combined with the differential evolution algorithm. The simulation results show that the traditional algorithm is only suitable for the situation where the true reflectivity of FBG is known, in contrast the improved algorithm can be applied to the situation where the true reflectivity of FBG is unknown. The proposed method can be used to improve the practicality of demodulation algorithms of FBG strain distribution.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; non-uniform strain distribution; differential evolution; demodulation

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 070.4790

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)作为一种光纤传感元件,具有体积小、质量轻及抗电磁干扰等优点,广泛应用于土木、电力、航空航天及生物化学等领域^[1-2]。通常,绝大部分被测参量的检测,如压力、湿度、振动、声场及电流等,都需要通过力学传递的形式使 FBG 产生应变来实现^[3-4]。因此,FBG 应变检测是其传感应用的基础^[5]。随着实际应用对应变检测需

求的不断提高,需要对一些结构精密而受力复杂的微小部件(如机器人手手指、微创手术臂等)进行应变分布的检测,但目前通常仅将 FBG 作为一种特殊的应变片使用,未充分利用其应变分布特征与输出光谱形变之间的关系^[6],倘若能够利用这种关系实现非均匀应变分布的测量,便能使 FBG 在这些领域发挥重要作用。

为实现非均匀应变解调,许多学者将传输矩阵法与优化算法相结合,使非均匀应变解调转化为多

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-09-21; 录用日期: 2018-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(51805054,51675068)

* E-mail: zhangwei1213052@126.com; ** E-mail: wmchen0802@126.com

参数优化问题,并研究了多种优化算法以提高非均匀应变解调的性能,例如遗传算法及其改进算法^[7-12]、模拟退火算法^[13]、单纯形法^[14]、粒子群及其改进算法^[15-17]以及差分进化算法^[18]。以上研究都将计算光谱与测量光谱之间的闵可夫斯基距离(称为P范数)作为目标函数,当能够准确获取测量光谱的反射率时,这些方法均能取得较好的结果。但是在实际进行非均匀应变测量时,传感系统往往采集到的是畸变的FBG反射强度谱,通过处理后可以得到归一化的反射谱,但反射谱的真实反射率并不知晓。此时,如果仍然采用计算谱与归一化测量谱的P范数作为目标函数,将会产生较大的解调误差。

基于以上分析,本文提出了利用相关系数改进优化目标函数的方法,以适应FBG真实反射率信息缺乏的情况,并结合差分进化算法对改进方法的有效性进行了仿真验证。

2 FBG 光谱的获取方式

在实际工程应用中,常采用的FBG测量系统如图1所示,光源发出的光通过耦合器到达FBG传感器,从FBG反射的光再由光电探测模块获取。通常,在FBG传感器被安装到被测对象之前,可以通过传感器产品厂家或FBG透射光谱的测量获得具有真实反射率的参考反射光谱 $R_{ref}(\lambda)$;而在FBG传感测量过程中,通过图1所示的测量系统仅能获得FBG的反射强度谱 $R_{meas}(\lambda)$;由于测量光谱产生变形,实际应用中并不能根据 $R_{ref}(\lambda)$ 计算出 $R_{meas}(\lambda)$ 的真实反射率,仅能通过对 $R_{meas}(\lambda)$ 的纵坐标进行线性化和归一化处理获得归一化的反射光谱 $R_{norm}(\lambda)$,如图2所示,而归一化的反射光谱并不能真实反映FBG的反射率。

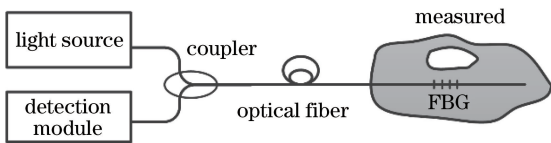


图1 常规FBG传感测量系统示意图
Fig. 1 Schematic of conventional FBG sensing measurement system

3 应变分布解调算法目标函数的改进理论

3.1 应变分布解调总体流程

将传输矩阵法与优化算法相结合的应变分布解调的一般流程如图3所示。首先随机生成一系列初

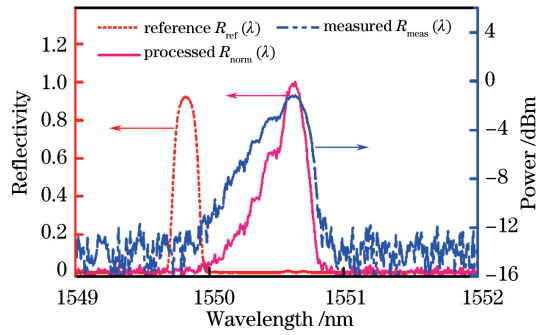


图2 FBG光谱示意图

Fig. 2 Schematic of FBG spectra

始化的应变分布;然后利用传输矩阵法计算出对应的畸变光谱;接着通过目标函数评价计算光谱与测量光谱的差异,将光谱差异最小时所对应的应变分布作为优选的应变分布。当不满足迭代终止条件时,继续采用不同的优化算法策略生成新的应变分布重复优选过程;当满足迭代终止条件时,输出最优的应变分布即为解调结果。从应变分布解调的一般流程上可以发现,优化算法策略的选择主要影响优化的进程,而目标函数设置是否合理则决定了最终优化方向的正确与否。

3.2 基于相关系数的目标函数改进理论

由FBG光谱的获取方式可知,许多实际情况下只能获得归一化的反射谱 $R_{norm}(\lambda)$,而传输矩阵法计算所得到的是具有真实反射率的反射谱 $R_{cal}(\lambda)$,两者的幅值并不一致,因此利用表征距离(闵可夫斯基距离)大小(其反映了谱形之间的重叠程度)的P范数 $E_{NP}[\epsilon(z)]$ 来评价两者的逼近程度并不合理。 $E_{NP}[\epsilon(z)]$ 可表示为

$$E_{NP}[\epsilon(z)] = \sum_{\lambda} \{ |R_{cal}[\lambda, \epsilon(z)] - R_{norm}(\lambda)|^p \}^{1/p}, \quad (1)$$

式中: $\epsilon(z)$ 表示应变分布; λ 表示波长。

虽然 $R_{norm}(\lambda)$ 与 $R_{cal}(\lambda)$ 在幅值上不同,但是当生成的应变分布与实际应变分布一致时,其对应的 $R_{cal}(\lambda)$ 与 $R_{norm}(\lambda)$ 在形状上具有相似性。由于相关系数正好能够度量两个变量之间的相似性,但又不强调两者距离的相近性,因此提出

$$E_{CC}[\epsilon(z)] = 1 - \frac{\text{Cov}\{R_{cal}[\lambda, \epsilon(z)], R_{norm}(\lambda)\}}{\sqrt{\text{Var}\{R_{cal}[\lambda, \epsilon(z)]\} \text{Var}\{R_{norm}(\lambda)\}}}, \quad (2)$$

式中: $E_{CC}[\epsilon(z)]$ 为优化的目标函数;Cov表示求协方差;Var表示求方差。在能够准确测得FBG反射率的情况下,如通过测量透射谱,或增加参考FBG或参考反射面^[19], (2)式中的 $R_{norm}(\lambda)$ 可以替

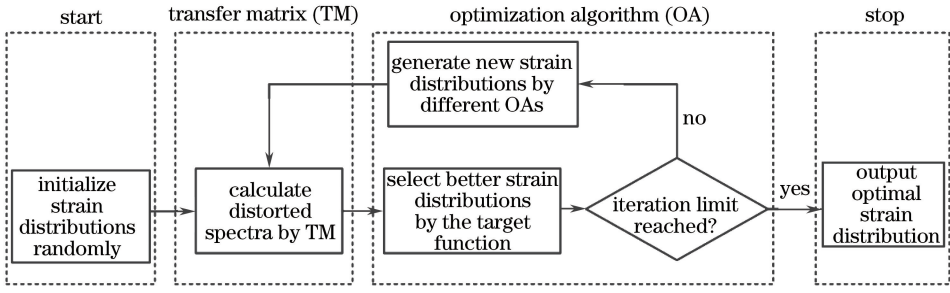


图 3 传输矩阵法与优化算法相结合的 FBG 应变分布解调的一般流程

Fig. 3 General demodulation process of FBG strain distribution by transfer matrix method and optimization algorithm

换为具有真实反射率的反射谱,上述目标函数仍然适用。

4 改进目标函数的差分进化应变分布解调方法

在大部分报道的 FBG 应变分布解调方法中^[9,13-14,18],常假设应变分布是连续的,并采用多项式函数表示,进而将应变分布解调转化为多项式函数系数的优化问题,以减少优化参数的个数。但实际传感中,被测对象即应变很可能是非连续分布的,事先也无法预知其分布形式。因此,研究适合任意应变分布的解调算法是非常必要的,但是这也会增加优化参数的个数,增大陷入局部最优的概率。为了尽量避免陷入局部最优,结合稳健性好的优化算法是提升解调准确性的重要保证。研究表明,差分进化算法在多种标准测试函数中的优化性能更优^[20]。因此,接下来将结合差分进化算法验证改进目标函数的可行性。

在实际传感应用中,常对 FBG 进行切趾以抑制

光谱旁瓣对测量的影响^[21],假设以 FBG 的轴向为 z 轴,如图 4 所示,切趾 FBG 的有效折射率分布可表示为

$$n_{\text{eff}}(z) = n_{\text{eff}} + g(z)\delta_{\text{neff}} \cos \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (3)$$

式中: n_{eff} 表示光纤的有效折射率; δ_{neff} 表示有效折射率变化的峰值; Λ 表示 FBG 折射率变化的周期; $g(z)$ 表示 FBG 的切趾函数。实际中常采用高斯函数作为切趾函数,即有

$$g(z) = \exp\left[-G\left(\frac{z-L/2}{L}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中: L 表示栅区长度; G 表示高斯函数系数。

当 FBG 感受到非均匀应变分布 $\epsilon(z)$ 时,为了计算其反射谱 $R_{\text{cal}}(\lambda)$,可以采用传输矩阵的思想将 FBG 栅区等分为 M 段周期均匀的子 FBG,如图 4 所示,其中第 k 段子 FBG 的周期可以等效为

$$\Lambda_k = \Lambda_0[1 + (1 - p_e)\epsilon(z_k)], \quad (5)$$

式中: Λ_0 表示初始周期; p_e 表示有效弹光系数。第 k 段子 FBG 的传输特性可以用矩阵 \mathbf{T}_k 表示:

$$\mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} \cosh(s_k \Delta L) - j \frac{\sigma_k}{s_k} \sinh(s_k \Delta L) & -j \frac{\kappa}{s_k} \sinh(s_k \Delta L) \\ j \frac{\kappa}{s_k} \sinh(s_k \Delta L) & \cosh(s_k \Delta L) + j \frac{\sigma_k}{s_k} \sinh(s_k \Delta L) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $\Delta L = L/M$; $s_k = \sqrt{\kappa^2 - \sigma_k^2}$; $\kappa = \delta_{\text{neff}} g(z)/\lambda$; $\sigma_k = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda - \pi/\Lambda_k$ 。

将 M 个矩阵级联起来便可得到整个光栅的传输特性,即

$$\begin{bmatrix} A(L) \\ B(L) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_M \cdot \mathbf{T}_{M-1} \cdots \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{T}_1 \begin{bmatrix} A(0) \\ B(0) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: A 和 B 分别表示 FBG 前向和后向传输模的振幅; $\mathbf{T}_1 \sim \mathbf{T}_M$ 表示对应 M 段子 FBG 的传输矩阵。利用边界条件 $A(0) = 1$ 和 $B(L) = 0$,并结合(7)式,

便可计算得出应变分布为 $\epsilon(z)$ 时的反射谱,即

$$R_{\text{cal}}(\lambda) = \left| \frac{B(0)}{A(0)} \right|^2. \quad (8)$$

根据上述传输矩阵的方法,任意应变分布 $\epsilon(z) = [\epsilon(z_1), \epsilon(z_2), \dots, \epsilon(z_M)]$, $\epsilon(z)$ 通过(5)式对应唯一的向量 $[\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_M]$, 而每一组向量 $[\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_M]$ 则对应唯一的计算反射谱(向量 $[\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_M]$ 与其倒序向量 $[\Lambda_M, \Lambda_{M-1}, \dots, \Lambda_1]$ 所对应的光谱相同,实际解调时可设置 $\Lambda_M > \Lambda_1$ 以

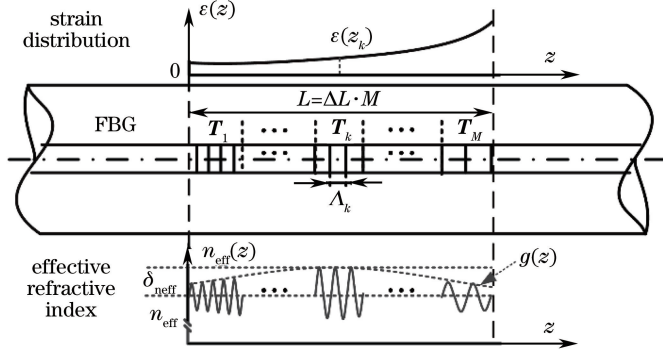


图 4 非均匀应变作用在 FBG 上的示意图

Fig. 4 Schematic of non-uniform strain applied on FBG

保证唯一性^[7])。为此,应变分布解调就转化为寻找向量 $[\varepsilon(z_1), \varepsilon(z_2), \dots, \varepsilon(z_M)]$ 使得其对应的 $R_{cal}(\lambda)$ 与 $R_{norm}(\lambda)$ 最匹配的优化问题。

为了结合差分进化算法,可将任意向量 $[\varepsilon(z_1), \varepsilon(z_2), \dots, \varepsilon(z_M)]$ 视为一个个体,即问题搜索空间中的一个解,通过种群初始化、变异、交叉、选择和终止操作,最终获得最优个体,相应的操作方法如下:

1) 种群初始化。假设种群规模大小为 N_p ,当前种群 P_t 便可表示为

$$P_t = \{ \mathbf{X}_{i,t} \mid \mathbf{X}_{i,t} = [x_{i,t}^1, x_{i,t}^2, \dots, x_{i,t}^M] = [\varepsilon_{i,t}(z_1), \varepsilon_{i,t}(z_2), \dots, \varepsilon_{i,t}(z_M)] \} \quad (i=1, 2, \dots, N_p), \quad (9)$$

式中: t 为当前进化的代数; $x_{i,t}^M$ 等价于应变 $\varepsilon_{i,t}(z_M)$ 。通常在种群初始化($t=0$)时,需要让 P_0 尽可能覆盖整个搜索空间,因此采用

$$x_{i,t}^j = \varepsilon_{min} + \text{rand}(0, 1) \cdot (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}), \quad (10)$$

对其进行初始化,其中 ε_{min} 和 ε_{max} 分别为应变分布的最小边界值和最大边界值。仿真中统一设置为 $[\varepsilon_{min}, \varepsilon_{max}] = [-1000 \mu\varepsilon, 2000 \mu\varepsilon]$ 。

2) 变异操作。变异是指对向量某些位置的数字进行改变,通过随机扰动形成新向量 $\mathbf{V}_{i,t}$ (通常被称作贡献向量)来保持种群的多样性,采用的变异策略为

$$\mathbf{V}_{i,t} = \mathbf{X}_{r_1,t} + F(\mathbf{X}_{r_2,t} - \mathbf{X}_{r_3,t}), \quad (11)$$

式中: $\mathbf{X}_{r_1,t}$, $\mathbf{X}_{r_2,t}$ 和 $\mathbf{X}_{r_3,t}$ 表示从 P_t 中随机选择的三个个体,且满足 $r_1 \neq r_2 \neq r_3$; $\mathbf{X}_{r_2,t} - \mathbf{X}_{r_3,t}$ 形成向量的差分操作; F 为缩放因子,控制差分向量的影响程度。

3) 交叉操作。交叉是指利用 $\mathbf{V}_{i,t}$ 和 $\mathbf{X}_{r_1,t}$ 进行混合形成新的试验向量 $\mathbf{U}_{i,t} = \{u_{i,t}^1, u_{i,t}^2, \dots, u_{i,t}^M\}$ 以促进群体间的信息分享,从而进一步提高种群的多

样性。采用交叉方式:

$$u_{i,t}^j = \begin{cases} v_{i,t}^j, & \text{if } [\text{rand}_j(0, 1) \leq C_R \text{ or } j = j_{\text{rand}}] \\ x_{i,t}^j, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $\text{rand}_j(0, 1)$ 表示 $[0, 1]$ 之间的随机小数; j_{rand} 表示 $[1, M]$ 之间的随机整数; $C_R \in [0, 1]$ 表示交叉概率。

4) 选择操作。选择操作是通过对比向量 $\mathbf{X}_{i,t}$ 与试验向量 $\mathbf{U}_{i,t}$ 的适应度,即对比两者分别对应的 $R_{cal}(\lambda)$ 与 $R_{norm}(\lambda)$ 的匹配程度,选择适应度好的向量进入下一代种群,选择方式为

$$\mathbf{X}_{i,t+1} = \begin{cases} \mathbf{U}_{i,t}, & E_{CC}(\mathbf{U}_{i,t}) < E_{CC}(\mathbf{X}_{i,t}) \\ \mathbf{X}_{i,t}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: E_{CC} 即为(2)式所改进的目标函数。

5) 终止操作。当优化进程到达预设的最小适应度或最大的进化代数,便终止程序。这里采用了最大进化代数为3000的终止操作。

改进目标函数的差分进化算法的应变分布解调流程如图5所示。

5 应变分布解调的仿真

为了验证所改进算法的有效性,选取了3种具有代表性的应变分布形式:

1) Case1 线性连续分布:

$$\varepsilon(z) = -2 \times 10^{-4} + 1.400 \times 10^{-5} z; \quad (14)$$

2) Case2 非线性连续分布:

$$\varepsilon(z) = 1.6 \times 10^{-5} z - 4 \times 10^{-8} z^2 + 6 \times 10^{-10} z^3; \quad (15)$$

3) Case3 非线性非连续分布:

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} 7 \times 10^{-8} z^2, & 0 \leq z \leq 6 \text{ mm} \\ 3 \times 10^{-4} + 7 \times 10^{-8} z^2, & 6 \text{ mm} \leq z \leq 10 \text{ mm} \end{cases} \quad (16)$$

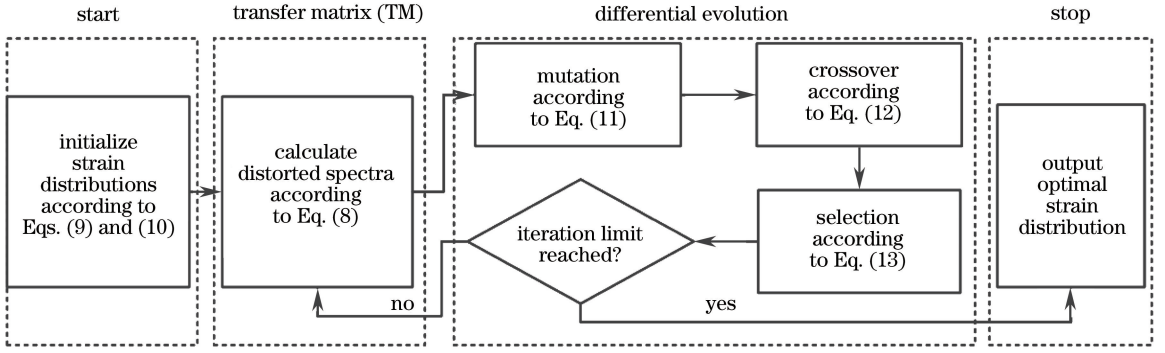


图 5 基于改进目标函数的差分进化算法的应变分布解调流程

Fig. 5 Demodulation process of strain distribution based on differential evolution algorithm with improved objective function

仿真所用的 FBG 参数 $L = 10 \text{ mm}$, $\Lambda = 529.905 \text{ nm}$, $n_{\text{eff}} = 1.4679$, $\delta_{\text{neff}} = 1.6 \times 10^{-4}$, $G = 8$, $M = 10$ 。实际应用中,在进行应变分布解调之前,需要确定 FBG 的参数,而 FBG 参数的确定可以通过对参考光谱 $R_{\text{ref}}(\lambda)$ 进行重构来实现,即把优化向量 $[\varepsilon(z_1), \varepsilon(z_2), \dots, \varepsilon(z_M)]$ 换成需要重构的 FBG 参数,如果已知刻写 FBG 的长度 L 和所用光纤的有效折射率 n_{eff} ,可以仅对向量 $[\Lambda, \delta_{\text{neff}}, G]$ 进行优化^[14];倘若 L 和 n_{eff} 未知,可对向量 $[L, \Lambda, n_{\text{eff}}, \delta_{\text{neff}}, G]$ 进行优化^[12]。差分进化算法的参数 $N_p = 100$, $F = 0.7$, $C_R = 0.95$;光谱的波长范围为 $[1549 \text{ nm}, 1552 \text{ nm}]$,波长分辨率为 10 pm 。

为了模拟实际情况,在所有仿真的反射谱中加入了信噪比为 25 dB 的随机噪声;为了对比验证改进算法对无法获知和能获知 FBG 真实反射率情况的有效性,分别采用归一化的反射谱与具有真实反

射率的反射谱进行两种情况的模拟;同时,采用常用的 2 范数 E_{N_2} 作为目标函数进行对比分析。

仿真结果如图 6~8 所示,可以看出:对于能获知真实反射率的情况,采用 E_{N_2} 和 E_{CC} 都能比较准确地解调出应变分布;而对于无法获知真实反射率的情况,常用 E_{N_2} 会出现明显的解调误差,而采用改进 E_{CC} 依旧能够较准确地解调出应变分布。此外,通过对比两种情况下 E_{CC} 所对应的结果可以发现,其重构的光谱和解调的应变分布都是一致的,这证明了 E_{CC} 不受测量光谱幅值的影响。在能获知反射率的情况下,采用 E_{N_2} 必须要尽量准确地测量出反射率,而 E_{CC} 不受幅值影响的特性能极大地降低对反射率测量精度的要求,因此,采用 E_{CC} 在反射率测量精度很低的情况下也具极大的优势。另外,从图 7(b) 中可以看出, E_{CC} 方法在 $0 \sim 2 \text{ mm}$ 区域出现了一定的解调误差,这主要是由于此区域的应变大

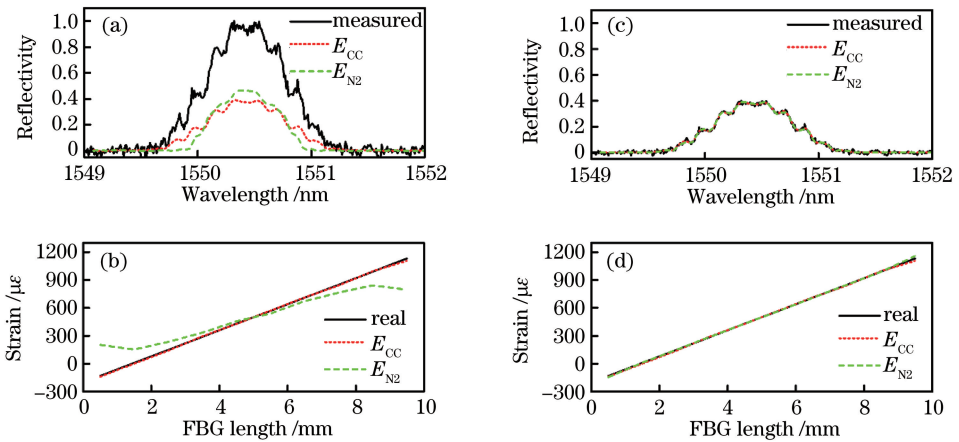


图 6 Case1 的结果。(a)无法获知反射率时反射谱的重构;(b)无法获知反射率时应变分布的解调;(c)获知反射率时反射谱的重构;(d)获知反射率时应变分布的解调

Fig. 6 Results in Case1. (a) Reconstruction of reflection spectrum when reflectivity is unknown; (b) demodulation of strain distribution when reflectivity is unknown; (c) reconstruction of reflection spectrum when reflectivity is known; (d) demodulation of strain distribution when reflectivity is known

致对应于图 7(a)中 1550~1550.3 nm 区域的光谱, 而这部分光谱的反射强度较低, 受噪声影响较大, 因

此出现了一定的解调误差; 但是, 相对于 E_{N2} , E_{CC} 已大幅提升了解调精度。

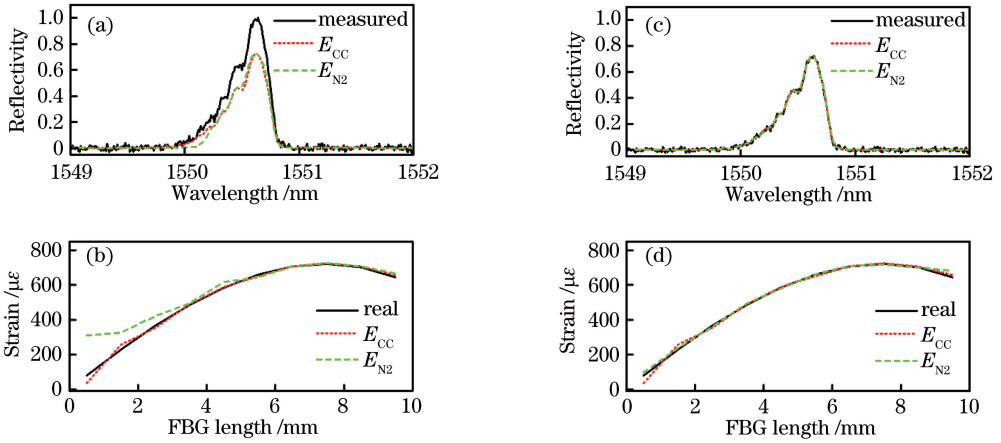


图 7 Case2 的结果。(a)无法获知反射率时反射谱的重构;(b)无法获知反射率时应变分布的解调;
(c)获知反射率时反射谱的重构;(d)获知反射率时应变分布的解调

Fig. 7 Results in Case2. (a) Reconstruction of reflection spectrum when reflectivity is unknown; (b) demodulation of strain distribution when reflectivity is unknown; (c) reconstruction of reflection spectrum when reflectivity is known; (d) demodulation of strain distribution when reflectivity is known

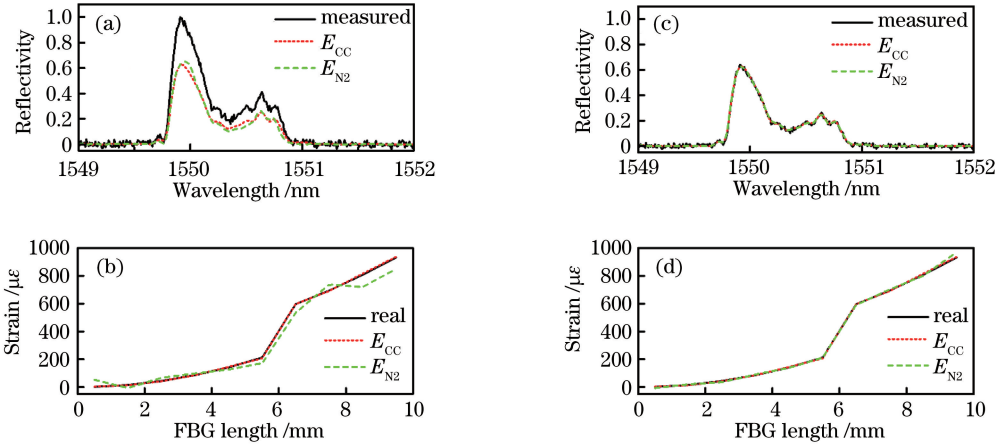


图 8 Case3 的结果。(a)无法获知反射率时反射谱的重构;(b)无法获知反射率时应变分布的解调;
(c)获知反射率时反射谱的重构;(d)获知反射率时应变分布的解调

Fig. 8 Results in Case3. (a) Reconstruction of reflection spectrum when reflectivity is unknown; (b) demodulation of strain distribution when reflectivity is unknown; (c) reconstruction of reflection spectrum when reflectivity is known; (d) demodulation of strain distribution when reflectivity is known

图 9 展示了两种目标函数值(即适应度)随迭代次数的变化关系, 可以看出改进算法 E_{CC} 与常规算法 E_{N2} 的收敛进程接近, 大约通过 500 代的进化便可实现收敛。此外, 经过 3000 代进化, 改进算法与常规算法消耗的时间比例约为 1。因此, 改进方法不会对收敛进程和计算时间产生明显影响。完成解调所消耗的时间受仿真光谱的数据长度、计算机的性能等因素影响, 文中的仿真程序完成 3000 代进化大约需要 50 min; 为了减少解调时间, 可以设置进化代数为 500 左右; 如果想进一步减少解调时间, 可

以考虑对差分进化算法的参数进行优化, 以加快其收敛速度, 同时可考虑结合现代并行计算技术来加快计算速度, 这也是下一步计划改进的方向。

6 结 论

FBG 传感测量中大多数情况下难以获知反射光谱的真实反射率, 针对此情况, 提出一种采用相关系数改进解调目标函数的理论与方法, 并结合差分进化算法, 通过数值仿真验证了改进方法的有效性, 且此方法也适用于对其他优化算法的改进。所提出

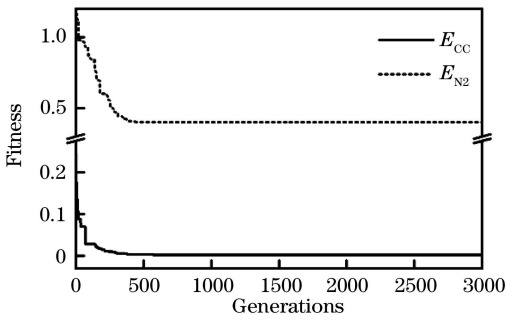


图 9 两种目标函数 E_{CC} 和 E_{N2} 的收敛过程

Fig. 9 Convergence process of two objective functions E_{CC} and E_{N2}

的改进方法对 FBG 应变分布解调的实际工程应用具有一定的参考价值。

参 考 文 献

[1] Sante D R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: recent advances and applications[J]. *Sensors*, 2015, 15(8): 18666-18713.

[2] 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.

[3] Qian M Y, Yu Y L. Tactile sensing of fiber Bragg grating based on back propagation neural network [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44 (8): 0806001.
钱牧云, 余有龙. 基于逆传播神经网络的光纤布拉格光栅触觉传感 [J]. *中国激光*, 2017, 44 (8): 0806001.

[4] Sun S Q, Chu F H. Temperature compensation of fiber Bragg grating current sensor based on optimized neural network algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1006001.
孙诗晴, 初凤红. 基于优化神经网络算法的光纤布拉格光栅电流传感器的温度补偿[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1006001.

[5] Zhang W. Key technology for reliability of fiber Bragg grating strain sensing system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 1-5.
张伟. 光纤布拉格光栅应变传感系统可靠性的关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 1-5.

[6] Guo Y X, Kong J Y, Xiong H G, *et al.* Advances in robot force/torque tactile sensing technology based on fiber Bragg grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050006.
郭永兴, 孔建益, 熊永根, 等. 基于光纤 Bragg 光栅

的机器人力/力矩触觉传感技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 050006.

[7] Gill A, Peters K, Studer M. Genetic algorithm for the reconstruction of Bragg grating sensor strain profiles[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(9): 1877-1884.

[8] Zheng S J, Zhang N, Xia Y J, *et al.* Research on non-uniform strain profile reconstruction along fiber Bragg grating via genetic programming algorithm and interrelated experimental verification [J]. *Optics Communications*, 2014, 315: 338-346.

[9] Zhang L Y, Shen X Y, Han Y, *et al.* A new population initialization method of genetic algorithm applied in FBG inhomogeneous strain demodulation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9620: 96200Z.

[10] Wang J, Wang Z F, Sui Q M, *et al.* Study of FBG strain distribution reconstruction based on improved genetic algorithm dual constraint[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0305004.
王静, 王正方, 隋青美, 等. 基于改进遗传算法双重约束的 FBG 应变分布重构研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0305004.

[11] Xia Y J, Zheng S J. Non-uniform strain profile reconstruction of FBG via genetic programming [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, 21 (8): 1141-1145.
夏彦君, 郑世杰. FBG 轴向非均匀应变分布的遗传规划重构方法 [J]. *光电子 • 激光*, 2010, 21 (8): 1141-1145.

[12] Huang G J, Wei C B, Chen S Y, *et al.* Reconstruction of structural damage based on reflection intensity spectra of fiber Bragg gratings[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25 (12): 125109.

[13] Shi C Z, Zeng N, Zhang M, *et al.* Adaptive simulated annealing algorithm for the fiber Bragg grating distributed strain sensing [J]. *Optics Communications*, 2003, 226 (1/2/3/4/5/6): 167-173.

[14] Detka M, Kaczmarek Z. Distributed strain reconstruction based on a fiber Bragg grating reflection spectrum[J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2013, 20(1): 53-64.

[15] Rodriguez-Cobo L, Cobo A, Lopez-Higuera J M. Recovering a fiber Bragg grating axial strain distribution from its reflection spectrum[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2327-2329.

[16] Wang H T, Zhang G Z, Zheng S J. Reconstruction of the nonuniform strain profile for fiber Bragg grating using dynamic particle swarm optimization algorithm and its experimental verification [J].

- Optical Engineering, 2013, 52(10): 107103.
- [17] Zou H B, Liang D K, Zeng J, *et al.* Quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for the reconstruction of fiber Bragg grating sensor strain profiles[J]. Optics Communications, 2012, 285(5): 539-545.
- [18] Wen X Y, Yu Q. Reconstruction of strain distribution in fiber Bragg gratings with differential evolution algorithm [J]. Optoelectronics Letters, 2008, 4(6): 403-406.
- [19] Guo H Y, Zheng Y, Tang J G, *et al.* Reflectivity measurement of weak fiber Bragg grating (FBG)[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2012, 27(6): 1177-1179.
- [20] Vesterstrom J, Thomsen R. A comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems[J]. Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation, 2004: 1980-1987.
- [21] Ali T A, Shehata M I, Mohamed N A. Design and performance investigation of a highly accurate tapered fiber Bragg grating-based strain sensor in single and quasi-distributed systems [J]. Applied Optics, 2015, 54(16): 5243-5251.