

doi:10.3788/gzxb20164512.1206003

FBG 分布式非均匀应变重构准确度分析研究

沈小燕, 韩娅, 张良岳, 李东升, 孙志鹏

(中国计量大学 计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘 要:以剥层算法为基础,分别从非均匀解调应变大小、重构算法的特征参量以及光栅初始结构参量等对光纤布喇格光栅应变重构准确度的影响进行相关研究分析.结果表明:工作长度为 5~30 mm 的光纤布喇格光栅最佳应变解调在 3 000 $\mu\epsilon$ 以内,在该应变解调范围内,保持光栅剥层的分层长度为 0.1 mm 左右时,应变重构准确度和效率较优,折射率调制幅度越小,应变重构误差越小;同时,对于非均匀应变检测使用的强光栅,折射率调制幅度约为 0.000 12 时,应变检测结果最好.本文的研究结果对提高非均匀应变的重构准确度具有重要的指导意义.

关键词:光纤布喇格光栅;分布式非均匀应变;重构准确度;特征参量;结构参量;剥层算法

中图分类号:O433.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)12-1206003-8

Analysis on the FBG Distributed Non-uniform Strain Reconstruction Precision

SHEN Xiao-yan, HAN Ya, ZHANG Liang-yue, LI Dong-sheng, SUN Zhi-peng

(College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Based on the LP (Layer Peeling) algorithm, the important influence factors on the reconstruction precision of the Fiber Bragg Gratings non-uniform strain, including the demodulation range of FBG non-uniform strain, the characteristic parameters of LP algorithm and the Fiber Bragg Gratings structure parameters, were numerically analyzed. From lots of simulating experiments, the results show, that the best proper strain demodulation is less than 3 000 $\mu\epsilon$ of Fiber Bragg Gratings with normal working length of 5~30 mm, and keeping the fractional length of nearby 0.1 mm for LP reconstruction algorithm can obtain the best precision of strain reconstruction. Remaining above conditions, it is found that the non-uniform strain reconstruction error is smaller when the refractive index modulation decreases, and for the strong grating, the refractive index modulation amplitude of approximate 0.000 12 is the best choice in Fiber Bragg Gratings non-uniform strain sensing. The results obtained here have certain guiding significance for improving the accuracy of Fiber Bragg Gratings non-uniform strain reconstruction.

Key words: Fiber Bragg grating; Distributed non-uniform strain; Strain reconstruction precision; Characteristic parameters; Structure parameters; Layer peeling algorithm

OCIS Codes: 060.3735; 060.2370; 060.2270; 150.1135

0 引言

光纤布喇格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 是一种光无源器件,可用于应变、温度、振动等量的传感^[1-3].当均匀 FBG 作非均匀应变传感时,FBG 的折射

率和调制周期的不均匀变化导致其反射光谱发生啁啾, Bragg 波长发生严重漂移和畸变,甚至完全淹没^[4].因此不能再简单利用均匀场中的处理方法^[5]对此 FBG 进行处理,需进一步对非均匀应变分布重构^[6]进行研究.国内外学者对于重构非均匀应变场分布这一难题

基金项目:国家自然科学基金 (Nos. 61205082, 51504229)、浙江省自然科学基金 (No. LQ14F050004) 和浙江省“仪器科学与技术”重中之重学科人才培养计划项目资助

第一作者:沈小燕 (1982-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为 FBG 传感. Email: xyshen@cjlu.edu.cn

收稿日期:2016-05-31; **录用日期:**2016-09-20

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

进行了相关研究分析^[7-11], Gill 等^[7]改进了一种利用遗传算法和反射谱的幅度信息并结合传输矩阵法来重构光栅轴向应变分布的方法,大大提高了非均匀应变分布的重构速度. 在国内,张荣祥^[8]等提出了一种基于混沌遗传算法的 Bragg 光栅轴向非均匀应变分布重构方法,选用适当的混沌算子,可以显著提高应变的重构准确度;夏彦君,王静^[9-10]基于新兴的遗传规划(Genetic Programming, GP)算法,提出了一种重构 FBG 轴向非均匀应变分布的方法,利用 GP 自动设计并优化应变分布的函数表达式,准确度和计算效率明显提高;张贵珍^[11]利用(Discrete Particle Swarm Optimization, DPSO)优化算法与 T 矩阵结合,一定程度上提高了 FBG 轴向非均匀应变分布重构速度及重构准确度. 上述文献在已知应变分布情况下从改进和优化重构算法入手来提高应变解调准确度,但截止目前鲜有文献全面深入地研究影响重构准确度的因素. 因此,本文基于剥层算法对 FBG 分布式非均匀应变重构准确度进行了研究,分别对非均匀解调应变大小、算法的特征参量选择以及 FBG 初始结构参量对 FBG 重构的影响做出了相应分析,以期得出提高非均匀应变重构准确度的最佳参量配置.

1 FBG 分布式非均匀应变重构理论

当 FBG 处于轴向非均匀应变场之中时往往需要通过重构算法来得到非均匀应变的分布情况. 通常将由已知 FBG 参量推导反射谱的过程称为 FBG 的模

拟,而由 FBG 反射谱逆推得到 FBG 参量的过程则被称为重构. 由于非均匀应变影响 FBG 结构参量,所以,可以通过重构的方法得到非均匀应变分布情况^[12].

1.1 非均匀应变场下 FBG 的模拟

FBG 模拟是指从已知轴向非均匀应变模拟得到 FBG 反射谱,区别于不受应变下的模拟,非均匀应变模拟一般借助于传输矩阵法实现^[13],它将 FBG 和作用于整个光栅上的非均匀应变均分为 N 层,当 N 足够大时,长度为 $\Delta_j = L/N (j=1, \dots, N)$ 的每层光栅所受应变认为近似均匀,如图 1. 由于每层光栅包含多个栅格周期,可等效于一个均匀 FBG,则每一小层 FBG 的光传输特性可以用典型的耦合模理论^[14]进行分析.

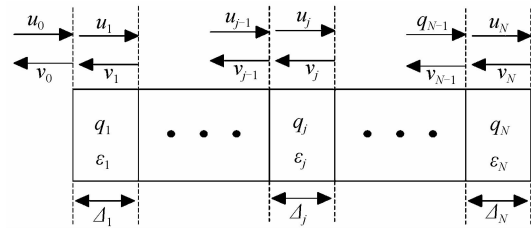


图 1 离散光栅模型

Fig. 1 Discrete grating model

根据传输矩阵理论,符合耦合模理论第 j 层和第 $j-1$ 层 FBG 的前向光 u 和后向光 v 可用一个矩阵联系起来,有

$$\begin{bmatrix} u_j \\ v_j \end{bmatrix} = T_j \begin{bmatrix} u_{j-1} \\ v_{j-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_j = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_j \Delta_j) - i \frac{\delta}{\gamma_j} \sinh(\gamma_j \Delta_j) & -i \frac{|q_j|}{\gamma_j} \sinh(\gamma_j \Delta_j) \\ i \frac{|q_j|}{\gamma_j} \sinh(\gamma_j \Delta_j) & \cosh(\gamma_j \Delta_j) + i \frac{\delta}{\gamma_j} \sinh(\gamma_j \Delta_j) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, T_j 为第 j 层传输矩阵, δ 被称作波数失谐量, 同时有 $\delta_j = 2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda_j - 1/\lambda_B)$, n_{eff} 为有效折射率, λ_j 是通过光栅的波长, λ_B 为 Bragg 波长, $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, Λ 为光栅周期, q_j 是第 j 层的耦合系数, $|q_j| = \pi s n_{\text{acj}}/\lambda_j$, n_{acj} 为折射率调制幅度(即一个光栅周期内的平均有效折射率变化)^[15], 对于均匀的不受外界作用的 FBG, n_{acj} 为常量, s 是折射率改变的对比度, 通常取 $s=1$, $\gamma_j^2 = q_j^2 - \delta_j^2$.

则处于均匀应变场中的整个光栅采用传输矩阵法表示为^[16]

$$\begin{bmatrix} u_N \\ v_N \end{bmatrix} = T_N \cdots T_j \cdots T_1 \cdot \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

当受非均匀应变的 FBG 被分为 N 层时, 近似每层受均匀应变 ϵ 作用, 则离散 FBG 非均匀应变的连续传感模型^[17]为 $\Delta\lambda_{Bj} = \lambda_{Bj}(1 - P_e)\epsilon_j$, $\Delta\lambda_{Bj}$ 为第 j 层光栅的波长改变量, P_e 为光弹系数, 因此, 当已知非均匀应变

作用 FBG 时, 每层的应变作用改变了本层光栅的 Bragg 波长, 即

$$\lambda'_{Bj} = \lambda_B + \lambda_B(1 - p_e)\epsilon_j \quad (4)$$

式(4)使波数失谐量改变, 从而改变每一层的传输矩阵, 即 T'_j , 因此整个光栅采用传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} u'_N \\ v'_N \end{bmatrix} = T'_N \cdots T'_j \cdots T'_1 \cdot \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T'_{11} & T'_{12} \\ T'_{21} & T'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

非均匀应变作用下, 光栅的复反射系数 $r(\delta)$ 振幅由边界条件 $u_0 = 1, v_N = 0$ 和 $r(\delta) = v_0 = -T'_{21}/T'_{22}$ 确定. 研究分析中取 $n_{\text{eff}} = 1.45, \Lambda = 534.5 \text{ nm}$, 当已知非均匀应变分布, 由已知光栅参量即可获得每一层光栅的耦合系数的幅值和波数失谐量, 从而得到每层的传输矩阵 T'_j , 最后通过式(5)获得任一波长 λ 下的复反射系数, 选取 λ 合适的范围即可获得非均匀应变下整个光栅的波谱.

1.2 FBG 分布式非均匀应变重构

FBG 分布式非均匀应变重构是非均匀应变场下 FBG 非均匀应变模拟的逆过程. 由离散 FBG 非均匀应变的连续传感模型可知, 想要获得光栅上非均匀应变分布, 首先需要得到每一层的光栅上的均匀应变, 而该应变与波长改变量有关. 文献[18-19]中认为, 非均匀应变下, 难以区分导致波长改变的具体因素是光栅周期还是光栅折射率. 为了统一分析, 由光栅的有效周期变化量代替波长变化量. 由此, 每层应变可表示为

$$\epsilon_j = \frac{\Delta\lambda_{Bj}}{\lambda_{Bj}}(1 - p_e) = \frac{\Lambda_{\text{eff}j} - \Lambda}{\Lambda}(1 - p_e) \quad (6)$$

$\Lambda_{\text{eff}j}$ 为第 j 层光栅应变下的有效栅格周期, 而 $\Lambda_{\text{eff}j}$ 与第 j 层耦合系数 q_j 的关系为

$$\Lambda_{\text{eff}j}(z) = \Lambda \left(1 + \frac{\Lambda}{2\pi} \frac{d\varphi_{qj}(z)}{dz} \right)^{-1} \quad (7)$$

z 为分层 FBG 上的位置, φ_{qj} 为第 j 层耦合系数的相位, 当 FBG 分层 N 足够大时, 由式(6)和式(7)得到第 j 层光栅的应变离散形式为

$$\epsilon_j = \left(\left(1 + \frac{\Lambda}{2\pi} \frac{\varphi_q(j+1) - \varphi_q(j)}{\Delta_j} \right)^{-1} - 1 \right) / (1 - p_e) \quad (8)$$

根据式(8)可知, 得到耦合系数后, 即可得到光栅上的应变分布, 因此, 求解光栅的耦合系数分布是光栅非均匀应变重构的关键所在. 求解离散分层中的耦合系数, 并利用式(8)获得非均匀应变的分布的过程即为重构, 典型的重构方法为剥层法, 重构的核心思想是“离散分层”, 每一层光栅也符合 T_j^i 的表达. 剥层算法中^[20], 为了提高运算效率, 将每一层的传输矩阵 T_j^i 用一个相移矩阵 T_j 和一个反射矩阵 T_ρ 的级联来近似 $T_j^i \approx T_{\Delta,j} \cdot T_{\rho,j}$ ^[21], 其中反射矩阵为

$$T_{\rho,j} = (1 - |\rho_j|^2)^{-1/2} \begin{bmatrix} 1 & -\rho_j^* \\ -\rho_j & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中复反射系数

$$\rho_j = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M r_j(\delta_m) = -\tanh(|q_j| \cdot \Delta) \frac{q_j^*}{|q_j|} \quad (10)$$

相移矩阵

$$T_{\Delta,j} = \begin{bmatrix} \exp(i\delta\Delta) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta\Delta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 M 为光谱点数, 且 $M \geq N$. 根据式(9)、(10)和(11), 复反射谱场传递公式可以表示为递归形式, 即

$$r_{j+1}(\delta) = \frac{r_j(\delta) - \rho_j}{1 - \rho_j^* \cdot r_j(\delta)} \exp(-i2\delta\Delta_j) \quad (12)$$

在仿真分析中, 利用传输矩阵法由式(5)可获得反

射光谱 $r(\delta)$ 作为剥层算法中的 $r_1(\delta)$, 经由式(10)和式(12)可获得每一层的反射系数 ρ , 且同时由式(10)可得每一层的耦合系数 q , 最后由式(7)和(8)得到每一层光栅上的有效栅格周期, 从而获得整个 FBG 上的应变分布情况.

通过对剥层算法重构非均匀应变的理论分析, 影响重构准确度的因素主要是剥层层数的选择以及不受应变下 FBG 初始结构参数的影响. 同时, 研究过程中还发现, 作用于 FBG 上应变的大小对重构准确度也存在较大影响.

2 分布式非均匀应变重构的仿真与分析

针对 5~30 mm 常规 FBG, 选择 5 mm、10 mm、20 mm 及 30 mm 作为对象进行重构准确度影响因素的研究, 分析得到的结果即可作为 5~30 mm 常规 FBG 的结果. 设计线性变化的非均匀应变, 通过传输矩阵法(式(5))模拟得到 FBG 的反射光谱, 以该反射谱为重构出发点, 由剥层算法(式(10)、(12)和(7))重构得到 FBG 参量, 并依据式(8)进一步得到 FBG 非均匀应变的分布. 仿真结果以重构得到的应变与设计输入应变之间的均方根误差评定应变解调准确度的高低, 均方根误差计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N v_i^2 / (N-1)} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (13)$$

式中, v_i 为算法求解误差 $v = x_i - x_{i0}$, i 为 FBG 各个分层, x_i 是重构应变, x_{i0} 为设计输入应变.

复反射光谱对应变的重构准确度有着重要影响, 研究中发现, 影响分布式非均匀应变作用下复反射光谱的因素主要有解调应变的大小和不受应变的 FBG 的自身参量, 即长度和折射率调制幅度.

2.1 解调应变大小

利用传输矩阵法及剥层算法重构应变分布情况, 设置光栅折射率调制幅度为 0.000 12 及分层数分别为 50、100、200 和 300, 不同长度 FBG 受不同线性增大的应变后的重构结果如图 2.

由图 2 可见, 对于 5~30 mm 长的 FBG, 解调应变大小为 1 000 $\mu\epsilon$ 、2 000 $\mu\epsilon$ 和 3 000 $\mu\epsilon$ 以内时, 实际重构应变基本与设计输入应变重合. 应变一旦大于 3 000 $\mu\epsilon$, FBG 的末端的应变重构出现较大发散的情况, 从而降低了 FBG 的应变解调准确度.

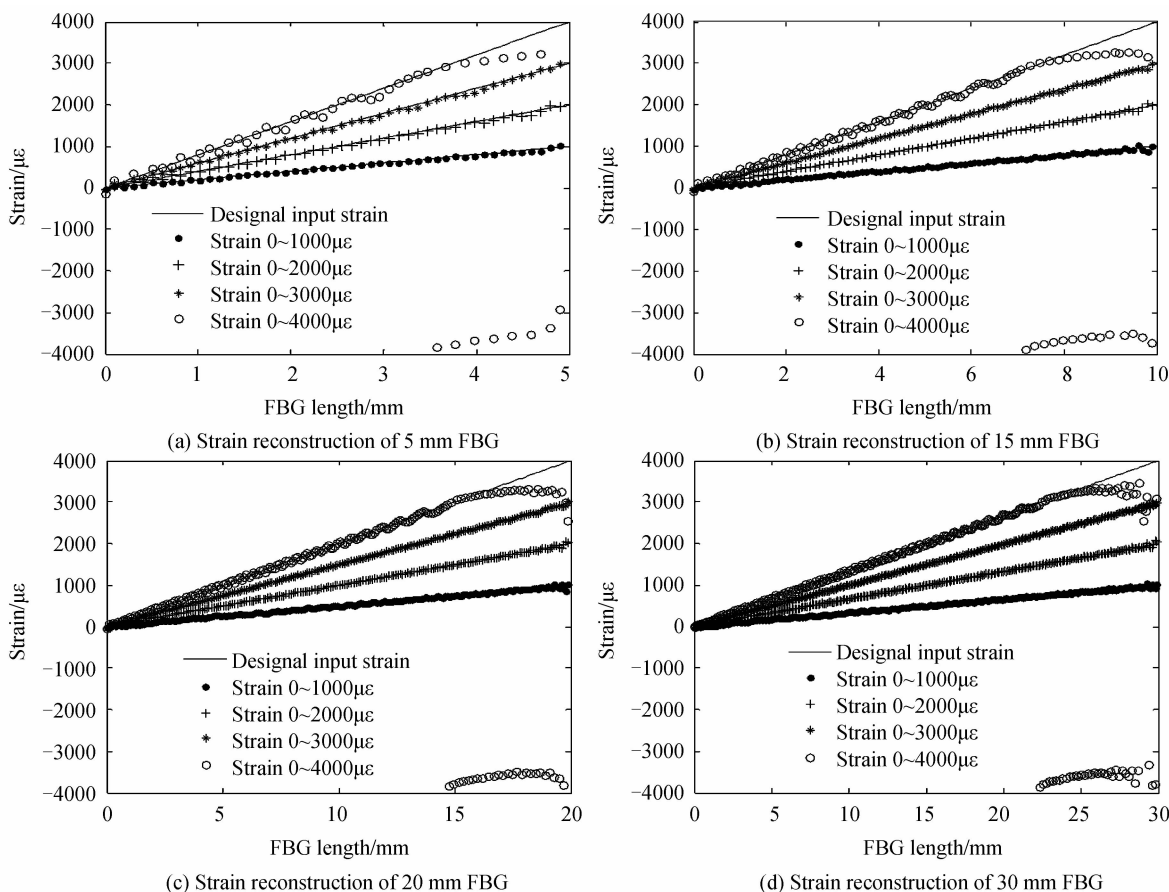


图 2 不同长度 FBG 的不同应变大小范围的重构结果

Fig. 2 Result of strain reconstruction with different range of strain of different length FBG

出现图中情况的原因是波数失谐量 δ 的范围由光栅分层的物理厚度 Δ 决定, $|\delta| < \pi/2\Delta$, 当输入的应变较大时, 有效的光谱信息会超出解算波长范围. 以 10 mm FBG 为例, 解调应变大小为 4 000 $\mu\epsilon$ 以内时, 反射光谱图如图 3.

图 3 中, 受较大应变作用(3 000 ~ 4 000 $\mu\epsilon$) 的 FBG 层所对应的 Bragg 波长不在解算波长的范围内, 造成 FBG 幅值和相位信息在大应变处丢失, 从而无法准确计算应变. 通过分析和仿真, 长度为 5 ~ 30 mm 的常规 FBG 利用剥层算法重构的应变解调大小为 3 000 $\mu\epsilon$ 以内范围时, 能有效抑制其末端应变解调的失

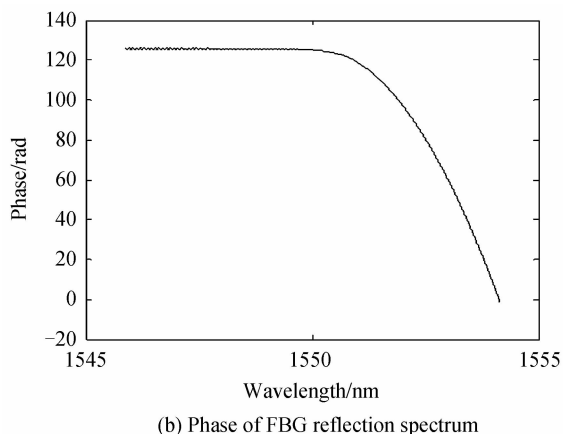
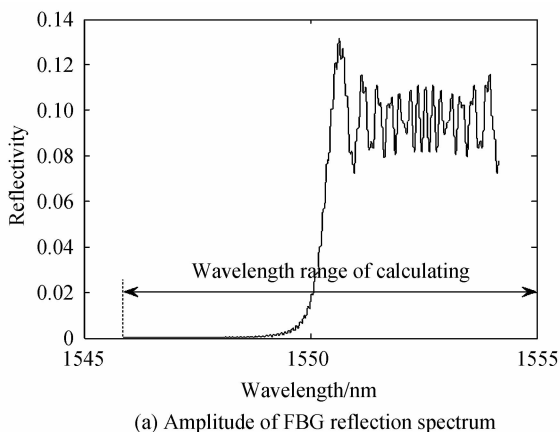


图 3 受较大非均匀应变的 FBG 的反射光谱
Fig. 3 FBG reflection spectrum with big strain

2.2 折射率调制幅度对重构准确度的影响

影响非均匀应变下的反射光谱的关键因素在于折射率调制幅度. 通常将折射率调制幅度大于或等于 0.000 12 的光纤光栅叫做强折射率光栅, 解调非均匀应变所采用的 FBG 即属于强光栅范围. 在非应变解调范围内, 以 10 mm FBG 为例, 剥层层数为 100, 设置折射率调制幅度为 0.000 12、0.000 15 以及 0.000 2 时, 由传输矩阵法模拟不同折射率调制幅度下 FBG 反射



光谱信息,该反射光谱的幅值和相位如图 4.

由图 4 可知,随着折射率调制幅度的增大,一定非均匀应变作用下的 FBG 反射谱波峰抖动现象加深,最大反射率及半高带宽增加,所对应的相位带宽增大,有

效波谱带宽前移.在以上述参量获取到的反射光谱信息的基础上,利用剥层算法分析 5~30 mm FBG 在不同折射率调制幅度下非均匀应变的解调情况如图 5.

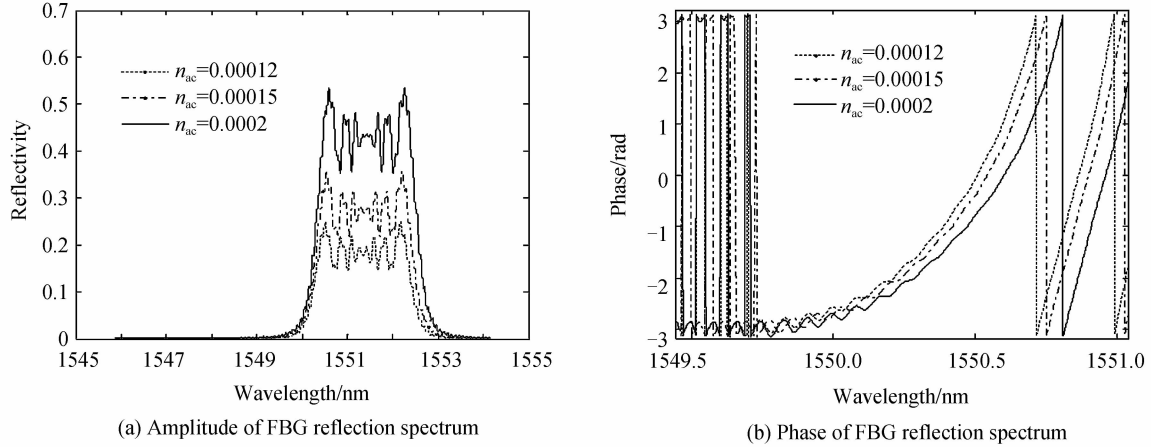


图 4 不同折射率调制幅度下的 FBG 的反射光谱
Fig. 4 FBG reflection spectrum with different refractive index modulation

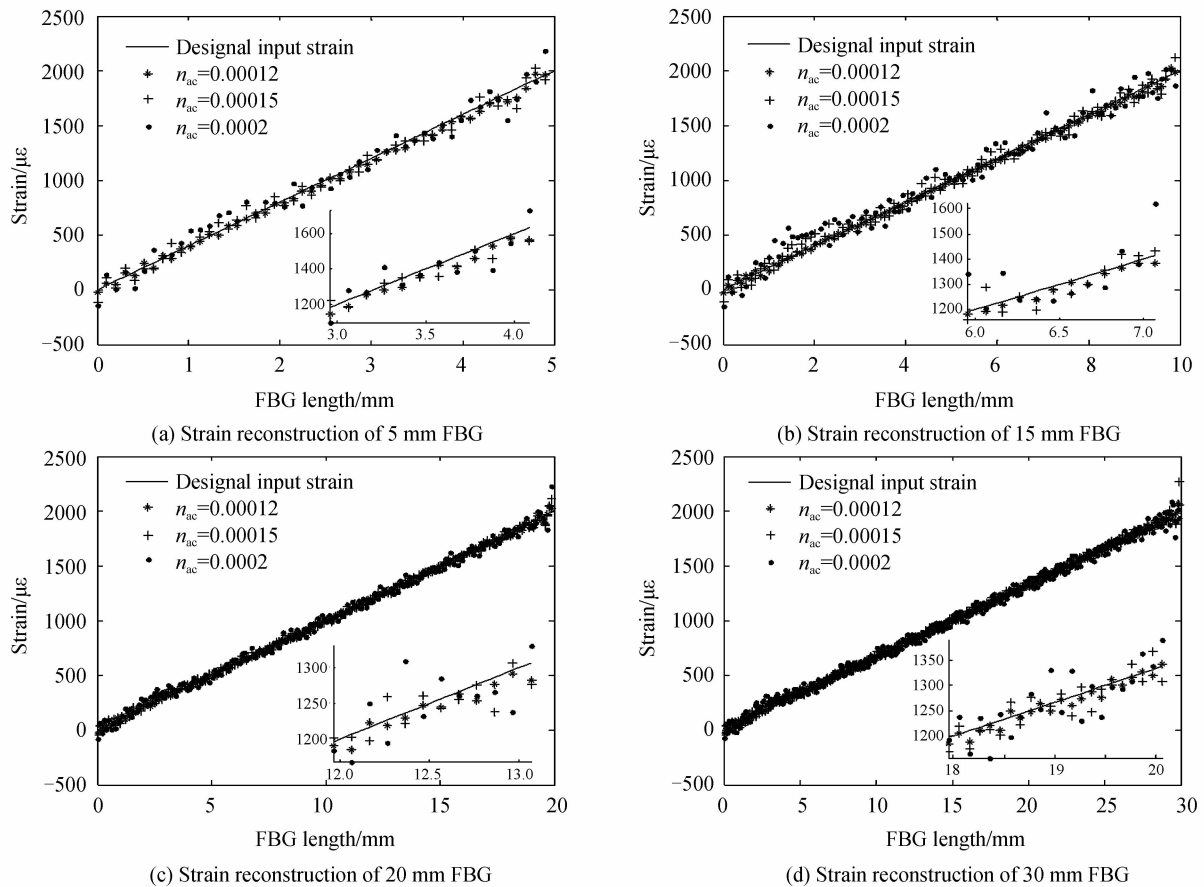


图 5 不同长度 FBG 不同折射率直流改变量的剥层算法重构结果

Fig. 5 Results of Strain reconstruction with different refractive index modulation of different FBG

由图 5 可见,折射率调制幅度为 0.000 12 的应变重构结果较好,结果更贴近设计输入应变;0.000 15 时,结果比 0.000 12 时分散;0.000 2 时,解调的应变较为分散,重构误差较大.5~30 mm FBG 在不同折射

率调制幅度下应变解调的均方根误差见表 1.

由表 1 可以看出,随着折射率调制幅度的增大,剥层算法重构出的应变较分散,均方根误差增大,准确度减小.并且,折射率调制幅度影响反射光谱的幅值与相

位信息,进而影响 FBG 的应变重构结果.对于常规的 FBG 非均匀应变解调使用的强折射光栅,折射率调制

幅度越小,重构结果越好.综上分析,折射率调制幅度约为 0.000 12 时,应变重构准确度较高.

表 1 不同长度 FBG 的不同折射率调制幅度的应变重构均方根误差

Table 1 RMS error of strain reconstruction with different refractive index modulation of different FBG

n_{sc}	$L=5$ mm	$L=10$ mm	$L=15$ mm	$L=20$ mm	$L=25$ mm	$L=30$ mm
0.000 12	20.2	15.0	13.3	11.1	11.5	11.0
0.000 15	25.1	22.7	20.1	25.9	25.3	24.4
0.000 2	40.2	39.8	38.7	39.5	41.3	44.1

注:均方根误差单位为 $\mu\epsilon$

2.3 分层数目与重构准确度

剥层算法中,同一 FBG 不同分层长度对重构准确度有较大的影响.当 FBG 分层数目过多时,会造成单一分层栅格周期数目过小而导致不能保持原有的传光特性,并且分层数目过多也会增加程序计算量;当 FBG 分层数目过少,单一分层长度过长,加载在其上的应变不能被认为近似均匀.在非均匀应变解调范围内,进行重构仿真,得到 5~30 mm 长 FBG 的不同分层数的应变解调结果及误差如图 6 及表 2.

以 2 000 $\mu\epsilon$ 以内线性增大的非均匀应变为例,由图 6、表 2 及更多分层数的研究,可知 5~30 mm 的

FBG,当分层数小于 FBG 长度的 10 倍(即分层长度为 0.1 mm)时,FBG 末端的重构出现较大偏差,重构误差较大;大于或等于 10 倍时,重构应变与设计输入的应变较好重合,光栅末端的重构良好.随着分层数的增加,均方根误差递减但减幅有限,且随着层数增加程序运算量急剧增加,运行速度缓慢.综上分析可得,5~30 mm FBG 在剥层层数定为光栅长度的 10 倍(分层长度为 0.1 mm)左右时,重构 3 000 $\mu\epsilon$ 以内应变的准确度较高,且能在不影响准确度的情况下降低程序运算量,提高算法效率.

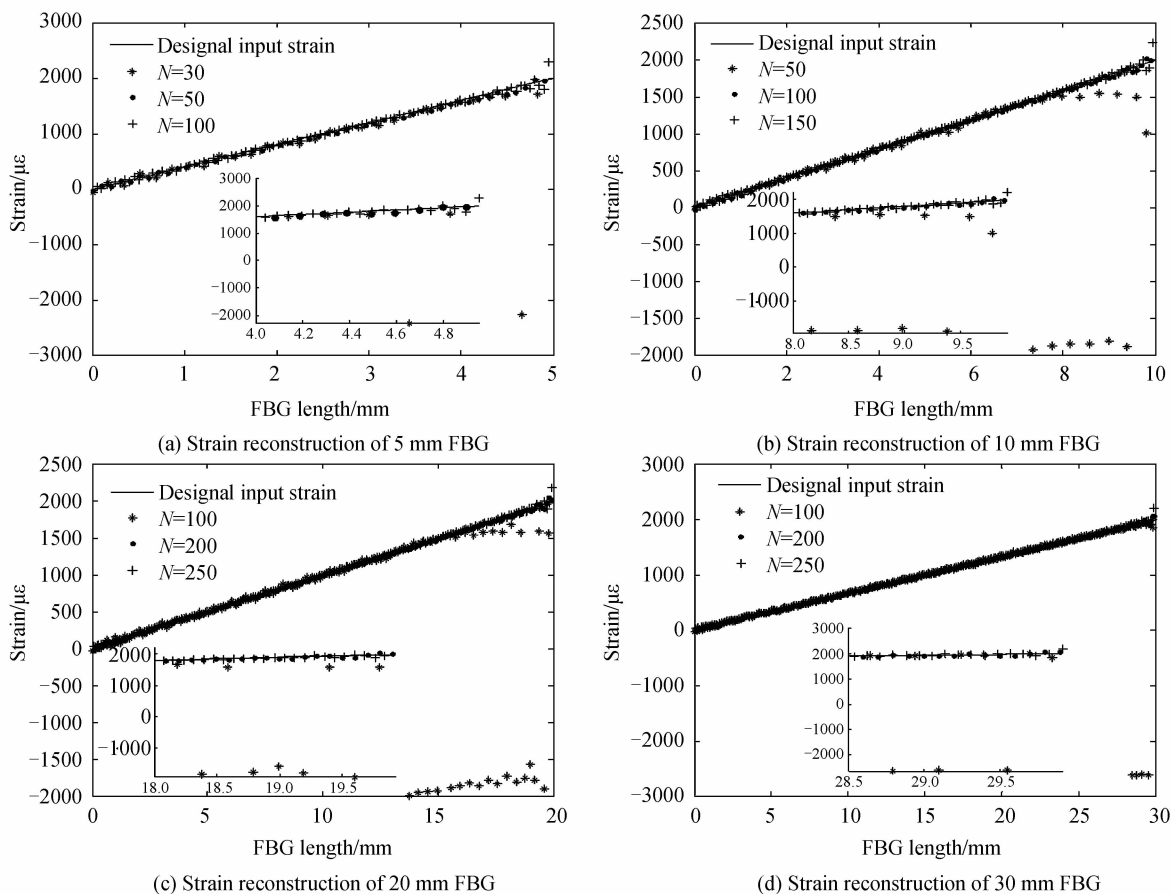


图 6 不同长度 FBG 的不同分层数目剥层算法重构结果

Fig. 6 Results of Strain reconstruction with different number of layers of different FBG

表 2 不同长度 FBG 的不同分层数的应变重构均方根误差

Table 2 RMS error of strain reconstruction with different number of layers of different FBG						
N	L=5 mm	L=10 mm	L=15 mm	L=20 mm	L=25 mm	L=30 mm
30	193	—	—	—	—	—
50	16.2	257	—	—	—	—
100	16.0	15.0	306	—	—	—
150	15.5	14.2	13.3	398	—	—
200	15.3	14.5	13.5	11.1	402	—
250	15.0	14.2	11.6	10.8	11.5	440
300	14.5	14.0	11.2	10.2	11.2	10.0
350	14.5	14.1	11.1	10.2	10.8	10.0

注:均方根误差单位为 $\mu\epsilon$

3 结论

本文基于剥层算法,深入研究 FBG 应变重构准确度的影响因素,经过理论推导及分析后发现影响 FBG 应变重构准确度的因素主要是非均匀应变解调范围、算法的特征参量及 FBG 初始结构参量,并通过仿真得到了较适合非均匀应变重构的参量,即栅区长度为 5~30 mm 的 FBG,在最佳的解调应变大小为 3 000 $\mu\epsilon$ 以内,保持光栅的分层长度为 0.1 mm 左右,折射率调制幅度约为 0.000 12 时,非应变重构的准确度最高。本文得出的结论对 FBG 分布式非均匀应变重构准确度的研究具有一定参考价值。

参考文献

- [1] HU Jun, YANG Yuan-hong, LIU Xue-jing. Gap fiber Bragg grating based micro-gap and temperature simultaneous measurement technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **44**(11): 1108003.
胡军, 杨远洪, 刘学静. 基于间隙光纤光栅的微间隙与温度同时测量技术[J]. *中国激光*, 2014, **44**(11): 1108003.
- [2] WU Jun, CHEN Wei-Min, SHU Yeu-jie, et al. Embedded strain homogenized FBG sensor for smart cables [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(7): 0706002.
吴俊, 陈伟民, 舒岳阶, 等. 锚头植入式应变均化光纤布喇格光栅测力传感器[J]. *光子学报*, 2015, **44**(7): 0706002.
- [3] ZHANG Ji-Jun, WU Zu-Tang, PAN Guo-feng, et al. Design of optical fiber grating based high-precision and low-frequency vibration sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 0128001.
张继军, 吴祖堂, 潘国峰, 等. 低频高灵敏度光纤 Bragg 光栅振动传感器设计[J]. *光子学报*, 2014, **43**(S1): 0128001.
- [4] KANG D, PARK S, HONG C, et al. The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradient and grating lengths [J]. *NDT and E International*, 2005, **38**(8): 712-718.
- [5] LONG J, WEI G Z, HAO Z. An embedded FBG sensor for simultaneous measurement of stress and temperature [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(1): 154-156.
- [6] LING H Y, LAU K T, CHENG L, et al. Embedded fiber Bragg grating sensors for non-uniform strain sensing in composite structures [J]. *Measurement Science & Technology*, 2005, **16**(12): 2415-2424.
- [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): 877-1884.
- [8] ZHANG Rong-xiang, ZHENG Shi-jie, XIA Yan-jun. The reconstruction of the of non-uniform strain profile by using chaos genetic algorithm [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(8): 1058-1062.
张荣祥, 郑世杰, 夏彦君. 基于混沌遗传算法的非均匀应变分布重构研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(8): 1058-1062.
- [9] XIA Yan-jun, ZHENG Shi-jie. 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.
- [10] WANG Jing, WANG Zheng-fang. Stud of FBG strain distribution reconstruction based on improved genetic algorithm dual constrain [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(3): 126-132.
王静, 王正方, 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): 126-132.
- [11] ZHANG Gui-zhen, WANG Hong-tao. Reconstruction of non-uniform strain profile for fiber bragg grating using dynamic particle swarm optimization algorithm [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2013, **35**(2): 174-179.
张贵珍, 王洪涛. FBG 非均匀应变分布的动态粒子群算法重构研究[J]. *压电与声光*, 2013, **35**(2): 174-179.
- [12] GAO Zhi-peng, YU Zhen-hong, XING Li-hua. A novel method for reconstructing strongly reflecting fiber bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 991-996.
高志鹏, 余震虹, 邢丽华. 一种重构强反射光纤布喇格光栅的新方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 991-996.
- [13] MAHANTA D K. Design of uniform fiber bragg grating using transfer matrix method [J]. *International Journal of Computational Engineering Research*, 2013, **3**(5): 8-13.
- [14] QIAN Jing-ren. Coupled-mode theory and its application to fiber optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1188-1192.
钱景仁. 耦合模理论及其在光纤光学中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1188-1192.
- [15] XIE Hai-he, LIN Zhen-heng, YAN Huang-ping, et al. Fiber-Bragg grating analyzed by transfer theory of membrane layer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1106003.
谢海鹤, 林震衡, 颜黄苹, 等. 膜层传输矩阵理论在布喇格光纤光栅分析中的应用[J]. *光子学报*, 2015, **44**(11): 1106003.
- [16] ZHANG Zi-jia, WANG Chang-min. Investigation of the transfer matrix of the fiber gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **06**(36): 1073-1077.
张自嘉, 王昌明. 光纤光栅传输矩阵研究[J]. *光子学报*, 2007, **06**(36): 1073-1077.

- [17] SHEN Xiao-yan, ZHANG Liang-yue, SUN Jie. Improved layer peeling algorithm to realize FBG non-uniform strain sense demodulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(12): 3734-3739.
沈小燕, 张良岳, 孙杰. 改进剥层法实现 FBG 非均匀应变传感解调[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(12): 3734-3739.
- [18] BOTSIS J, HUMBERT L, COLPO F, *et al.* Embedded fiber Bragg grating sensor for internal strain measurements in polymeric materials[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(3): 491-510.
- [19] CORIC D, LIMBERGER H G, SALATHERP. Distributed measurements of fiber birefringence and diametric load using optical low-coherence reflectometry and fiber gratings[J]. *Optical Society of America*, 2006, **14**(24): 11804-11813.
- [20] SKAAR J, WANG L G, ERDOGAN T. On the synthesis of fiber Bragg gratings by layer peeling[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, **37**(2): 165-173.
- [21] RUAN Yi, PEI Li, HAO Chun-hui, *et al.* Research on V-I transfer matrix method for analyzing fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **12**(29): 3267-3271.
阮义, 裴丽, 祁春慧, 等. 光纤光栅的 V-I 传输矩阵法研究[J]. *光学学报*, 2009, **12**(29): 3267-3271.