

# 光纤光栅谱形复用解调中粒子群算法的参数优化

张梅, 张伟\*, 章鹏, 陈伟民

重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

**摘要** 结合应用广泛的粒子群算法, 通过数值仿真, 深入探究了其关键参数对解调误差的影响规律, 发现光纤布拉格光栅(FBG)谱形复用数量越大, 谱形重叠程度越大, 关键参数选择的范围越小。以最大解调误差为评价指标, 定量分析得出了关键参数的合理设置范围, 在优化条件下, FBG 谱形复用解调性能得以提升, 并通过实验验证了这一结论。

**关键词** 光纤光学; 谱形复用; 粒子群算法; 解调; 参数优化

**中图分类号** TN253

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.0706001

## Parameter Optimization in Particle Swarm Algorithm for Spectral Shape Multiplexing Demodulation of Fiber Bragg Grating

Zhang Mei, Zhang Wei\*, Zhang Peng, Chen Weimin

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

**Abstract** This study uses the extensively applied particle swarm algorithm to investigate the influence of the key parameters on the demodulation error using numerical simulation. The simulation results illustrate that the available range of key parameters reduces with the increase of the multiplexing number of the fiber Bragg grating (FBG) and the overlapping degree of spectral shape. Furthermore, with the maximum demodulation error as an evaluation index, we obtain a reasonable setting range of key parameters using a quantitative analysis. Under the optimal conditions, the performance of the spectral shape multiplexing demodulation of the FBG is improved, which is confirmed by the corresponding experiment.

**Key words** fiber optics; spectral shape multiplexing; particle swarm algorithm; demodulation; parameter optimization

**OCIS codes** 060.3735; 060.4230; 070.4790

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器以其抗电磁干扰、高精度、易实现复用等特点,在准分布式温度、应变等测量领域有广泛的应用前景<sup>[1-6]</sup>。由于FBG传感器易实现复用,因此用一个传感系统便能同时实现多个测试点的测量。FBG常规的复用方式有波分复用、空分复用、时分复用及这三种复用方式相互结合等<sup>[7-9]</sup>。相比波分复用,其他几种复用方式会增加传感系统的复杂性。而采用最简单的波分复用方式时,要求FBG光谱之间不发生相互重叠,因此需

要为每个FBG传感器分配一个独立的工作区间,且相邻光谱之间要设置隔离带;但由于光源带宽有限,可分配的工作区间数量也有限,FBG的复用数目因此受到限制<sup>[10]</sup>。为了保持传感系统结构的简单性,且进一步提高传感网络中FBG的复用量,有学者提出光谱形状复用的方法<sup>[11-13]</sup>,这种方法利用光谱的形状信息来实现解调,允许光谱发生重叠,这样在一个工作区间内能够复用多个FBG,使其复用量成倍增长。

对于FBG谱形复用技术,其解调算法是实现复用的关键。目前,FBG谱形复用常结合优化算

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-02-02; 录用日期: 2019-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(51805054)、中国博士后科学基金(2018M643405)

\* E-mail: zhangwei1213052@126.com

法来实现解调。为了提高解调的准确性,许多学者研究了不同的优化算法及其改进算法,如遗传算法<sup>[14-15]</sup>、粒子群算法(PSO)<sup>[16-17]</sup>、差分进化算法<sup>[18-19]</sup>和模拟退火算法<sup>[12,20]</sup>等。通过改进不同的优化算法固然可以提高解调的准确性,但同时优化算法参数设置对解调结果的准确性也有很大影响;而目前FBG谱形复用解调中优化算法参数的设置主要凭研究者的经验确定,因此存在一定的主观性。例如,同样是利用粒子群算法,有学者<sup>[17,21]</sup>设置加速常数 $c_1$ 、 $c_2$ (粒子群算法的参数)为1.49,也有学者<sup>[10,16]</sup>设置加速常数 $c_1$ 、 $c_2$ 为2。倘若参数设置不合理,很容易使解调结果陷入局部最优,难以达到提升解调性能的效果。针对此问题,本文将选择广泛应用的粒子群算法,深入研究其参数设置对FBG谱形复用解调误差的影响规律,并通过数值仿真和实验进行定量分析,提出合理设置参数的方法。

## 2 基于粒子群算法的FBG谱形复用解调原理

对于如图1所示的FBG并联谱形复用工作方式<sup>[16]</sup>,调谐激光器发出的光通过耦合器进入 $n$ 路FBG中, $n$ 个FBG的反射叠加谱被光电探测器(PD)接收。为消除旁瓣对测量的影响,通常会对用作传感测量的FBG进行切趾,因此FBG反射光谱可用高斯函数表示。在谱形复用解调中,为保证解

调出的中心波长与FBG一一对应,要求每个FBG的反射率不同。假设第 $i$ 个FBG反射光谱谱形为 $g_i(\lambda, \lambda_{B_i})$ ,表达式为

$$g_i(\lambda, \lambda_{B_i}) = r_i \exp \left[ \frac{(\lambda - \lambda_{B_i})^2}{B_G} \right], \quad (1)$$

式中: $r_i$ 和 $\lambda_{B_i}$ 分别表示第 $i$ 个FBG的反射率和中心波长; $B_G$ 为3 dB带宽。探测器探测到的 $n$ 个FBG叠加谱为

$$R(\lambda, \lambda_{B_1}, \lambda_{B_2}, \dots, \lambda_{B_n}) = \sum_{i=1}^n g_i(\lambda, \lambda_{B_i}). \quad (2)$$

(2)式中 $g_1(\lambda, \lambda_{B_1}), g_2(\lambda, \lambda_{B_2}), \dots, g_n(\lambda, \lambda_{B_n})$ 的谱形可能不重叠,也可能部分重叠或完全重叠。为了从 $R(\lambda, \lambda_{B_1}, \lambda_{B_2}, \dots, \lambda_{B_n})$ 中解调出 $n$ 个FBG的中心波长 $(\lambda_{B_1}, \lambda_{B_2}, \dots, \lambda_{B_n})$ ,可以构造函数

$$R_V(\lambda, s_1, s_2, \dots, s_n) = \sum_{i=1}^n g_i(\lambda, s_i), \quad (3)$$

式中: $s_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示构造函数中对应的每个FBG的中心波长。将 $R_V(\lambda, s_1, s_2, \dots, s_n)$ 与 $R(\lambda, \lambda_{B_1}, \lambda_{B_2}, \dots, \lambda_{B_n})$ 进行对比,并通过 $g(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 定量表征其重合程度:

$$g(s_1, s_2, \dots, s_n) = \int_0^{\infty} [R(\lambda, \lambda_{B_1}, \lambda_{B_2}, \dots, \lambda_{B_n}) - R_V(\lambda, s_1, s_2, \dots, s_n)]^2 d\lambda. \quad (4)$$

当且仅当 $(s_1, s_2, \dots, s_n) = (\lambda_{B_1}, \lambda_{B_2}, \dots, \lambda_{B_n})$ 时, $g(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 取得最小值,原始谱和重构谱达到最优匹配。

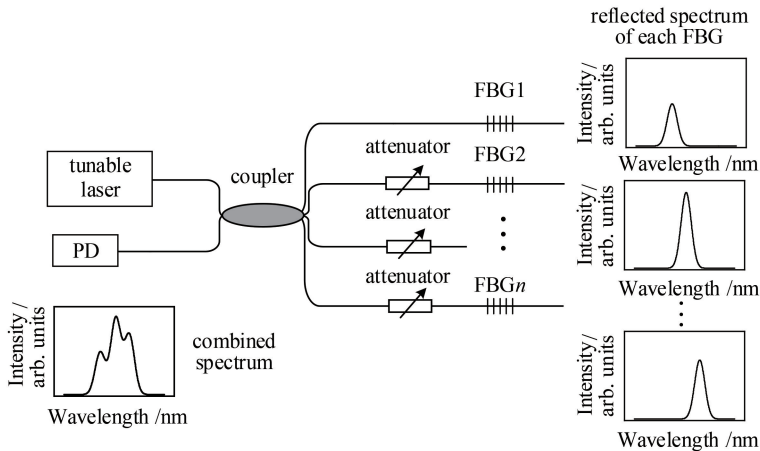


图1 FBG并联谱形复用系统原理图

Fig. 1 Schematic of FBG parallel spectral shape multiplexing system

为了获得最优匹配,将 $n$ 维向量 $\mathbf{S} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 视为优化参数, $g(\mathbf{S})$ 视为优化目标函数,利用粒子群算法优化得到最小的 $g(\mathbf{S})$ ,便可以解调出 $(\lambda_{B_1}, \lambda_{B_2}, \dots, \lambda_{B_n})$ 。如果将 $\mathbf{S}$ 视为一个粒子的位

置,将 $\Delta\mathbf{S} = (\Delta s_1, \Delta s_2, \dots, \Delta s_n)$ 视为粒子的飞行速度,则可利用粒子群算法在 $n$ 维搜索空间中形成随机的粒子群。假设粒子群中共含 $K$ 个粒子,在第 $t$ 次循环迭代中,群体中第 $j (j=1, 2, \dots, K)$ 个粒子

的位置和速度可以表示为  $\mathbf{S}_j^t$  和  $\Delta\mathbf{S}_j^t$ , 通过计算比较优化目标函数的值, 还可以得到此粒子经历过的最佳位置  $\mathbf{p}_{\text{best}j}^t = (p_{j1}^t, p_{j2}^t, \dots, p_{jn}^t)$ , 以及群体中所有粒子经历过的最佳位置  $\mathbf{g}_{\text{best}j}^t = (g_{j1}^t, g_{j2}^t, \dots, g_{jn}^t)$ ; 那么在第  $t+1$  次迭代中, 第  $j$  个粒子的位置和速度可分别表示为

$$\Delta\mathbf{S}_j^{t+1} = \chi \cdot \Delta\mathbf{S}_j^t + c_1 \mathbf{R}_{\text{rand}1} (\mathbf{p}_{\text{best}j}^t - \mathbf{S}_j^t) + c_2 \mathbf{R}_{\text{rand}2} (\mathbf{g}_{\text{best}j}^t - \mathbf{S}_j^t), \quad (5)$$

$$\mathbf{S}_j^{t+1} = \mathbf{S}_j^t + \Delta\mathbf{S}_j^t, \quad (6)$$

式中:  $c_1$  和  $c_2$  为加速常数;  $\mathbf{R}_{\text{rand}1}$  和  $\mathbf{R}_{\text{rand}2}$  为生成的随机矩阵;  $\chi$  为压缩因子。在标准粒子群算法中,  $\chi$  为人为设置的数值, 但是研究表明, 通过将  $\chi$  表示为  $c_1$  和  $c_2$  的函数, 可以减少参数设置的个数, 且收敛性更好<sup>[22-23]</sup>。  $\chi$  可表示为

$$\chi = \frac{2}{|2 - (c_1 + c_2) - \sqrt{(c_1 + c_2)^2 - 4(c_1 + c_2)}|},$$

$$c_1 + c_2 > 4. \quad (7)$$

通过一定迭代次数后, 所有粒子经历过的最佳位置  $\mathbf{g}_{\text{best}j}^t$  即可认为是  $n$  个 FBG 的中心波长 ( $\lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{Bn}$ )。由 (5)~(7) 式可以看出, 在该算法中,  $c_1$  和  $c_2$  是两个关键的参数, 分别影响着局部搜索和全局搜索的进程, 对准确解调出 ( $\lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{Bn}$ ) 具有很大的影响。

### 3 数值仿真

为了探索  $c_1$  和  $c_2$  对谱形复用解调误差的影响, 首先需要获得不同形式的叠加谱, 而利用 (2) 式可以仿真获得多个 FBG 不同重叠程度的叠加光谱。考虑到实际测量中可能出现不重叠、部分重叠和完全重叠的情况, 分别仿真获得了 2, 3, 4, 5 个 FBG 复用时具有代表性的叠加状态, 如图 2~5 所示。仿真所采用的光谱分辨率为 1 pm, 其余参数见表 1。

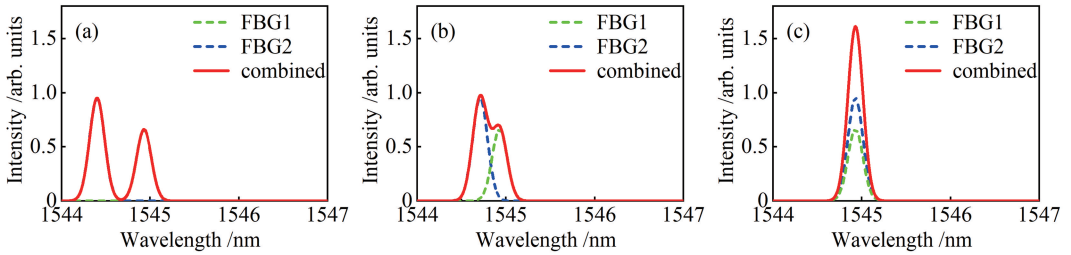


图 2 两个 FBG 的叠加谱。(a) 不重叠; (b) 部分重叠; (c) 完全重叠

Fig. 2 Superimposed spectra of two FBGs. (a) Non-overlapping; (b) partially overlapping; (c) completely overlapping

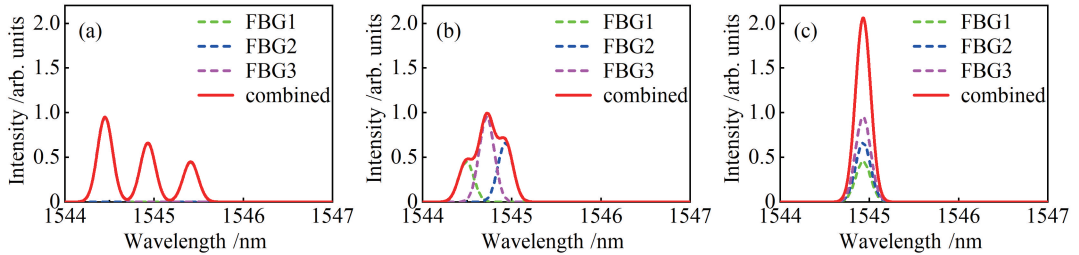


图 3 三个 FBG 的叠加谱。(a) 不重叠; (b) 部分重叠; (c) 完全重叠

Fig. 3 Superimposed spectra of three FBGs. (a) Non-overlapping; (b) partially overlapping; (c) completely overlapping

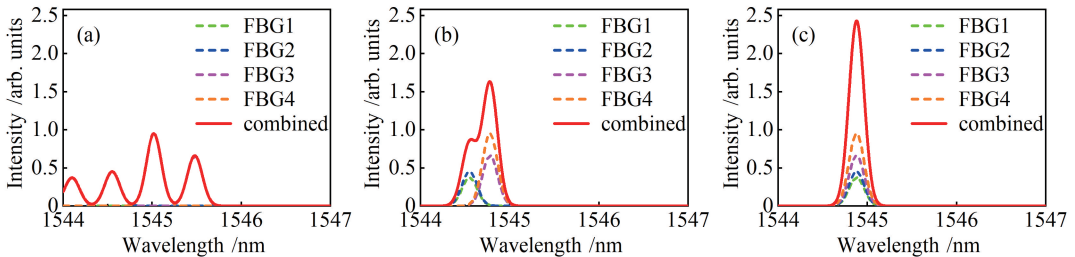


图 4 四个 FBG 的叠加谱。(a) 不重叠; (b) 部分重叠; (c) 完全重叠

Fig. 4 Superimposed spectra of four FBGs. (a) Non-overlapping; (b) partially overlapping; (c) completely overlapping

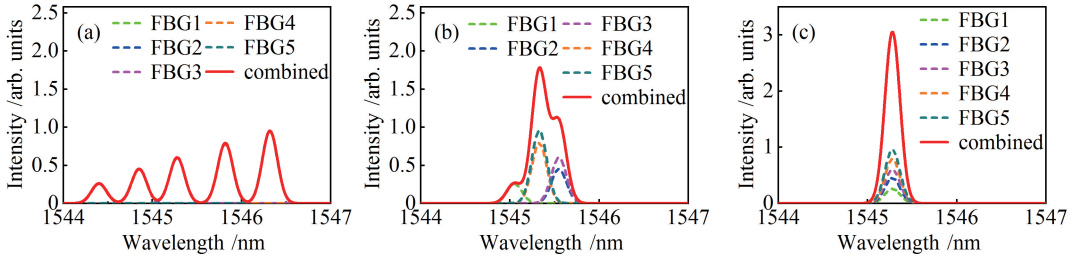


图 5 五个 FBG 的叠加谱。(a)不重叠;(b)部分重叠;(c)完全重叠

Fig. 5 Superimposed spectra of five FBGs. (a) Non-overlapping; (b) partially overlapping; (c) completely overlapping

表 1 FBGs 叠加光谱仿真参数

Table 1 Simulation parameters of superimposed spectra of FBGs

Parameter	Overlapping	Number of FBGs is 2		Number of FBGs is 3			Number of FBGs is 4			
		FBG1	FBG2	FBG1	FBG2	FBG3	FBG1	FBG2	FBG3	FBG4
$r$		0.66	0.95	0.45	0.66	0.95	0.37	0.45	0.66	0.95
$B_G/\text{nm}$		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$\lambda_B/\text{nm}$	Non	1544.93	1544.40	1545.41	1544.93	1544.45	1544.10	1544.55	1545.48	1545.02
	Partially	1544.93	1544.71	1544.49	1544.93	1544.72	1544.55	1544.55	1544.78	1544.78
	Completely	1544.93	1544.93	1544.93	1544.93	1544.93	1544.88	1544.88	1544.88	1544.88
Parameter	Overlapping	Number of FBGs is 5								
		FBG1	FBG2	FBG3	FBG4	FBG5				
$r$		0.26	0.45	0.60	0.79	0.95				
$B_G/\text{nm}$		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2				
$\lambda_B/\text{nm}$	Non	1544.40	1544.85	1545.28	1545.82	1546.32				
	Partially	1545.05	1545.55	1545.55	1545.33	1545.33				
	Completely	1545.28	1545.28	1545.28	1545.28	1545.28				

针对仿真所获取的 12 种叠加光谱,接下来将采用上述基于粒子群算法的复用解调算法对其分别进行解调。研究表明,当粒子群算法的粒子群数目  $K$  和迭代次数  $t_{\max}$  大到一定程度时,  $K$  和  $t_{\max}$  将不会对优化结果产生明显的影响<sup>[17]</sup>,这里将其分别设置为 50 和 500。而对于关键参数  $c_1$  和  $c_2$ ,为了定量分析其影响,以 0.1 的变化量分别对其进行扫描式设置,令  $c_1 \in (0, 6)$ ,  $c_2 \in (0, 6)$ ,且满足  $c_1 + c_2 > 4$ ,并以最

大解调误差  $V_{\text{error}}$ [(8)式]来定量表示其对解调误差的影响,即

$$V_{\text{error}} = \max | \{s_i - \lambda_{B_i}\} |, i = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

式中:  $(s_1, s_2, \dots, s_n)$  表示解调出的  $n$  个 FBG 的中心波长;  $(\lambda_{B_1}, \lambda_{B_2}, \dots, \lambda_{B_n})$  为  $n$  个 FBG 真实的中心波长。加速常数  $c_1$  和  $c_2$  对不同 FBG 复用数量和不同光谱重叠程度解调误差的影响如图 6~9 所示。

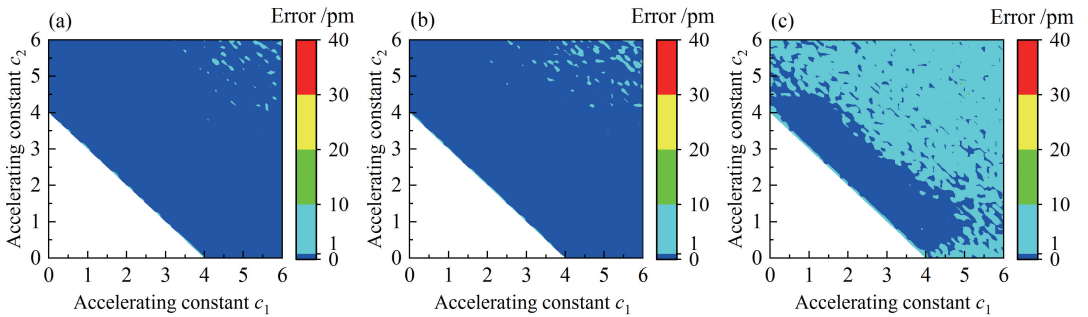


图 6 两个 FBG 时  $c_1$  和  $c_2$  对解调误差的影响。(a)不重叠;(b)部分重叠;(c)完全重叠

Fig. 6 Influences of  $c_1$  and  $c_2$  on demodulation error for two FBGs. (a) Non-overlapping;

(b) partially overlapping; (c) completely overlapping



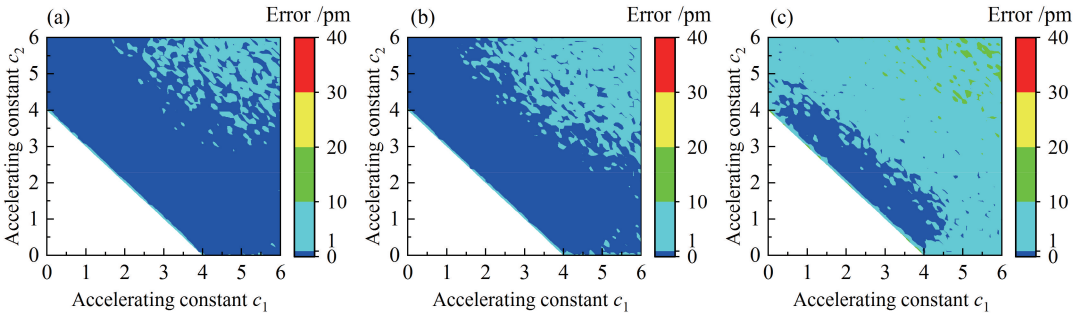


图 7 三个 FBG 时  $c_1$  和  $c_2$  对解调误差的影响。(a)不重叠;(b)部分重叠;(c)完全重叠  
Fig. 7 Influences of  $c_1$  and  $c_2$  on demodulation error for three FBGs. (a) Non-overlapping;  
(b) partially overlapping; (c) completely overlapping

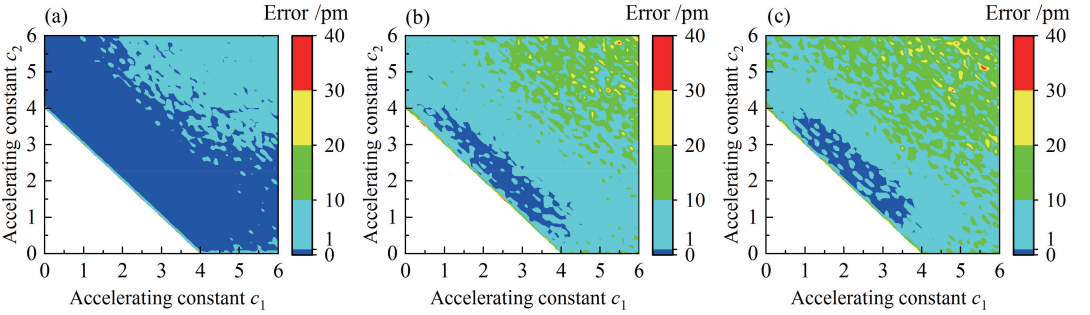


图 8 四个 FBG 时  $c_1$  和  $c_2$  对解调误差的影响。(a)不重叠;(b)部分重叠;(c)完全重叠  
Fig. 8 Influences of  $c_1$  and  $c_2$  on demodulation error for four FBGs. (a) Non-overlapping;  
(b) partially overlapping; (c) completely overlapping

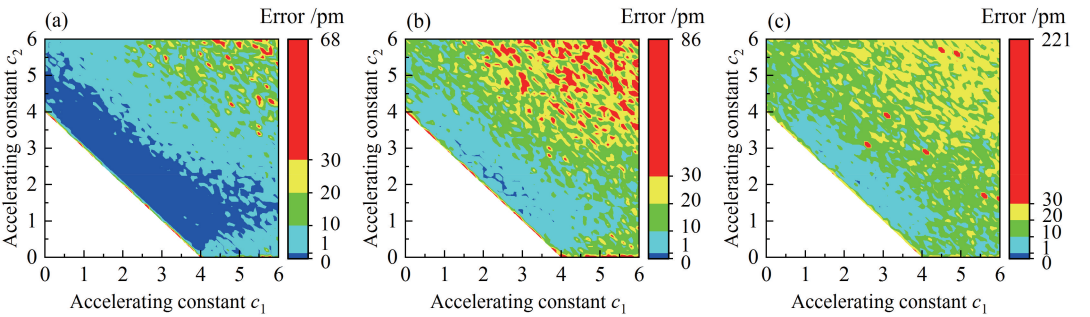


图 9 五个 FBG 时  $c_1$  和  $c_2$  对解调误差的影响。(a)不重叠;(b)部分重叠;(c)完全重叠  
Fig. 9 Influences of  $c_1$  and  $c_2$  on demodulation error for five FBGs. (a) Non-overlapping;  
(b) partially overlapping; (c) completely overlapping

从以上仿真结果可以看出,随着 FBG 光谱重叠程度的增大,解调误差增大的区域越来越明显;当光谱完全重叠时, $c_1$  和  $c_2$  的取值对解调误差的影响最明显。此外,随着 FBG 复用数量的增多,能够保障解调误差较小的区域也越来越小。可以看出,在 FBG 复用数量一定的情况下,可以通过 FBG 完全重叠时的情况确定  $c_1$  和  $c_2$  的合理设置范围,当最大解调误差  $V_{\text{error}} \leq 1 \text{ pm}$  和  $V_{\text{error}} \leq 10 \text{ pm}$  时,推荐  $c_1$  和  $c_2$  的合理范围如表 2 所示。另一方面,从表 2 也可以看出,若可接受的最大解调误差  $V_{\text{error}} \leq 1 \text{ pm}$ ,则在一个工

作波长区间内此解调算法可复用的最大 FBG 数为 3 个;若可接受的最大解调误差  $V_{\text{error}} \leq 10 \text{ pm}$ ,则在一个工作波长区间内 FBG 的最大复用数量为 4 个。需要说明的是,若传感系统中光源的带宽分  $n$  个工作波长区间,则利用此算法最大可复用数便为  $3n$  个或  $4n$  个。

此外,图 10 给出了解调算法在不同光谱重叠程度、FBG 复用数量,以及不同  $c_1$  和  $c_2$  取值情况下的收敛情况。从图 10 可以看出,对于所有情况,迭代次数小于 200 便能够基本实现收敛,而完成 500 次迭代的时间约为 6 s。此外,从图 10(a)可以看出,

光谱重叠程度对解调算法的响应速度影响并不大；从图 10(b)可以看出，FBG 复用数量越大，算法响应越慢；从图 10(c)可以看出，在  $c_1$  和  $c_2$  满足合理设

置范围内， $c_1$  和  $c_2$  的取值越大，响应速度越快。因此，在保证  $c_1$  和  $c_2$  合理设置范围条件下，可考虑取较大的  $c_1$  和  $c_2$ ，以提升解调速度。

表 2 参数  $c_1$  和  $c_2$  的合理设置范围

Table 2 Reasonable setting ranges of parameters  $c_1$  and  $c_2$

Number of FBGs	$E_{\max} \leq 1 \text{ pm}$	$E_{\max} \leq 10 \text{ pm}$
2	$4.1 < c_1 + c_2 < 5.5$ & $ c_2 - c_1  < 3.5$	$4.1 < c_1 + c_2 < 8$ & $ c_2 - c_1  < 4$
3	$4.1 < c_1 + c_2 < 5$ & $ c_2 - c_1  < 3$	$4.1 < c_1 + c_2 < 6$ & $ c_2 - c_1  < 4$
4	None	$4.1 < c_1 + c_2 < 5.5$ & $ c_2 - c_1  < 3$
5	None	None

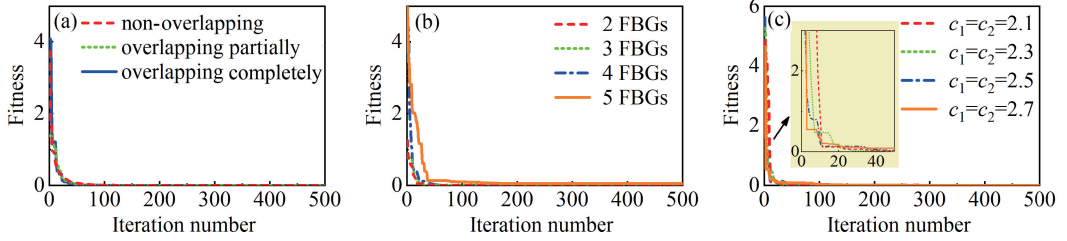


图 10 不同条件下解调算法的收敛曲线。(a)四个 FBG 不同光谱重叠程度的收敛曲线；(b)完全重叠时不同 FBG 复用数目的收敛曲线；(c)四个 FBG 完全重叠时不同  $c_1$  和  $c_2$  取值的收敛曲线

Fig. 10 Convergence curves of demodulation algorithm under different conditions. (a) Convergence curves of four FBGs under different overlapping degrees; (b) convergence curves of different FBG multiplexing numbers under completely overlapping; (c) convergence curves of different  $c_1$  and  $c_2$  for four FBGs under completely overlapping

### 4 实验研究

为验证上述仿真结果，依照图 11(a)所示的 FBG 并联谱形复用方式搭建了实验系统，实验装置

如图 11(b)所示。调谐激光器发出的光经耦合器进入 4 路 FBG 中，光电探测装置探测到经 FBG 反射回的叠加光谱并将其发送至计算机，探测系统的光谱分辨率为 1 pm。

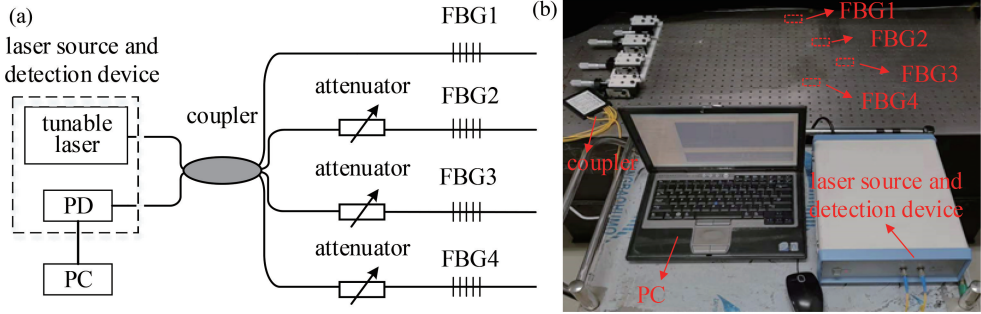


图 11 FBG 并联谱形复用实验系统图。(a)实验装置原理图；(b)实验装置图

Fig. 11 Experimental system of FBG parallel spectral shape multiplexing.

(a) Schematic of experimental setup; (b) picture of experimental setup

由于当 4 个 FBG 完全重叠时，解调结果受  $c_1$  和  $c_2$  取值的影响最大，因此选取了中心波长参数相近的 4 个 FBG，在实验前分别测得其实际中心波长分别为 1552.006, 1552.000, 1551.996, 1551.994 nm。为了使 4 路 FBG 具有不同的反射强度，在第 2,3,4 路光纤中接入了可调衰减器并进行调节，最终将 4 路 FBG 反射强度比例调整到  $r_1:r_2:r_3:r_4=1:0.84:0.51:0.26$ ，此时光电探测器探测到

的叠加谱如图 12(a)所示。从图 12(a)可以看出，FBG 的实际光谱并非理想的高斯光谱，如果仍采用理想高斯函数构造叠加光谱[即(2)式中的  $g_i(\lambda, \lambda_{Bi})$  为理想的高斯函数]，并按照数值仿真的方法计算得到如图 12(b)所示的解调误差分布，可以发现，虽然误差的分布与仿真结果具有相似性，但是整体的解调误差远大于仿真的误差。为了减小由实际非理想高斯光谱造成的解调误差，采用实际测量的

FBG 谱形构造叠加光谱[即将(2)式中的  $g_i(\lambda, \lambda_{B_i})$  对应换成第  $i$  个 FBG 实测的反射光谱], 然后再按照类似数值仿真的方法计算得到如图 12(c) 所示的解调误差分布, 可以看出, 1 pm 以内和 10 pm 以内的解调误差区域都与仿真结果[图 8(c)]基本接近,

这充分说明了优化区域内  $c_1$  和  $c_2$  取值要明显优于非优化区域。此外, 在实际测量时, 为了减小 FBG 非理想高斯光谱的影响, 应当考虑提前测量存储每个 FBG 的反射谱形, 并以之构成解调过程中的叠加谱。

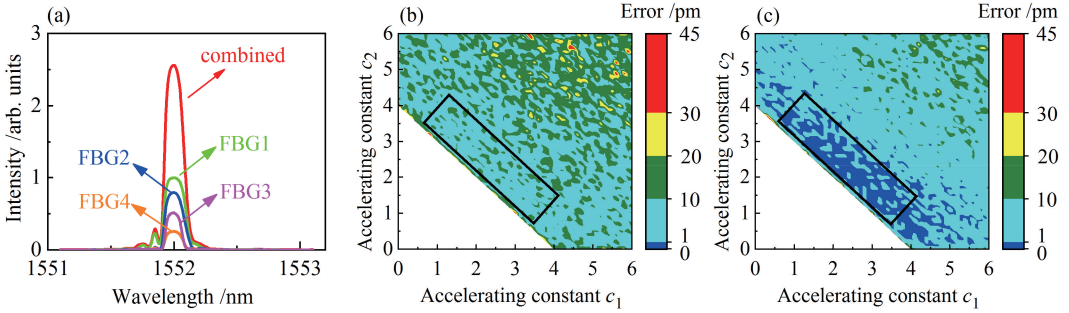


图 12 四个 FBG 并联复用实验结果。(a)四个 FBG 的光谱及其重叠谱;(b)  $c_1$  和  $c_2$  对叠加光谱解调误差的影响(采用高斯函数构造叠加光谱);(c)  $c_1$  和  $c_2$  对叠加光谱解调误差的影响(采用实测 FBG 光谱构造叠加谱)

Fig. 12 Experimental results of parallel multiplexing of four FBGs. (a) Spectra of four FBGs and their superimposed spectrum; (b) influences of  $c_1$  and  $c_2$  on demodulation error (using Gaussian functions to construct superimposed spectrum); (c) influences of  $c_1$  and  $c_2$  on demodulation error (using measured FBG spectra to construct superimposed spectrum)

## 5 结 论

深入探究了粒子群算法中加速常数对 FBG 并联谱形复用解调误差的影响规律。通过数值仿真, 得出了加速常数  $c_1$  和  $c_2$  的合理设置范围, 并搭建了 FBG 谱形复用实验系统, 解调实测叠加光谱可知, 实验结果与仿真结果相吻合。此外, 对于 FBG 串联谱形复用的情况, 其叠加光谱模型与并联情况有所区别, 并联时 FBG 光谱是独立的, 可以将不同 FBG 光谱直接叠加构造叠加谱; 而串联时, 链路中 FBG 的反射光强会相互影响, 叠加光谱不能将 FBG 的光谱直接相加<sup>[16]</sup>。但是, 叠加光谱模型的不同并不影响参数优化的过程, 理论而言, 本研究成果的优化参数区域同样适用于串联情况。随着 FBG 重叠光谱数目的增多, 解调也愈发困难, 如何改进解调算法以增大复用量等问题仍有待深入研究。

## 参 考 文 献

[1] Yeh C H, Zhuang Y H, Tsai N, *et al.* Capacity and capability enhancements of FBG sensor system by utilizing intensity and WDM detection technique[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26 (3): 035026.  
 [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] Xie K, Zhang H Y, Zhao Y S, *et al.* Structural health monitoring of power transmission system based on optical fiber sensor under transmission line galloping [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 070606.  
 谢凯, 张洪英, 赵衍双, 等. 导线舞动条件下输电系统结构健康监测的光纤研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 070606.  
 [4] Wang P Z, Liu C T, Li H C, *et al.* A quasi distributed fiber Bragg grating sensing demodulation system design based on LabVIEW [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 022801.  
 王鹏致, 刘春桐, 李洪才, 等. 一种基于 LabVIEW 的准分布式光纤光栅传感解调系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 022801.  
 [5] Liu S, Han X Y, Xiong Y C, *et al.* Distributed vibration detection system based on weak fiber Bragg grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0210001.  
 刘胜, 韩新颖, 熊玉川, 等. 基于弱光纤光栅阵列的分布式振动探测系统[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0210001.  
 [6] Zhang W, Shu C Q, Zhang M, *et al.* Theory and method of improving optimization objective function in demodulation algorithm of fiber Bragg grating strain distribution [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0206002.

- 张伟, 苏超乾, 张梅, 等. 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[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0206002.
- [7] Cao P Q, Xu G L. Large capacity and fast FBG sensing system based on marshalling measurement and edge filter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1010003.  
曹品奇, 许国良. 基于分组测量和边沿滤波的大容量光纤光栅快速传感系统[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1010003.
- [8] Dai Y B. Study on fibre Bragg grating sensing characteristics and multipoint multiplexing technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 8-12.  
代勇波. 光纤光栅传感特性与多点复用技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 8-12.
- [9] Liu K, Jing W C, Liu T G, *et al.* Tolerance extension of a dynamic fiber sensing system [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2008, 19(6): 731-734.  
刘琨, 井文才, 刘铁根, 等. 一种动态光纤传感系统的容限扩展[J]. 光电子 • 激光, 2008, 19(6): 731-734.
- [10] Li C L. Researches on multiplexing and demodulation technique of fiber grating based on particle swarm optimization-simulated annealing algorithm [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016: 24-26.  
李彩玲. 基于粒子群模拟退火算法的光纤光栅复用解调技术的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016: 24-26.
- [11] Chen Y, Cheng Y N, Liu H L. Demodulation of light sensing overlapping spectral signal by improved particle swarm optimization algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0710003.  
陈勇, 程亚男, 刘焕淋. 利用改进粒子群优化算法解调光传感重叠光谱信号[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0710003.
- [12] Qi Y F, Li C L, Jiang P, *et al.* Spectral shape multiplexing techology of fiber Bragg gratings using simulated annealing algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0906004.  
齐跃峰, 李彩玲, 江鹏, 等. 利用模拟退火算法研究光纤布拉格光栅的光谱形状复用技术[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0906004.
- [13] Kang S Q, Ju H B, Yang G X, *et al.* Demodulation technique of FBG multiplexed sensing based on wavelength division multiplexing and spectral shape multiplexing[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(4): 466-469.  
康守强, 巨红兵, 杨广学, 等. 波分复用加光栅光谱形状复用的FBG传感解调技术[J]. 光电子 • 激光, 2009, 20(4): 466-469.
- [14] Li P C, Zhao X Z. Increasing the number of series FBG sensors in WDM network using a genetic algorithm [C] // 2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, June, 25-27, 2008, Chongqing, China. New York: IEEE, 2008: 3604-3607.
- [15] Shi C Z, Chan C C, Jin W, *et al.* Improving the performance of a FBG sensor network using a genetic algorithm[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, 107(1): 57-61.
- [16] Guo G D, Hackney D, Pankow M, *et al.* Interrogation of a spectral profile division multiplexed FBG sensor network using a modified particle swarm optimization method[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(5): 055204.
- [17] Liang J J, Suganthan P N, Chan C C, *et al.* Wavelength detection in FBG sensor network using tree search DMS-PSO [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(12): 1305-1307.
- [18] 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.
- [19] Liu D, Tang K, Yang Z Y, *et al.* A fiber Bragg grating sensor network using an improved differential evolution algorithm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(19): 1385-1387.
- [20] Yang G X, Wang J B. Applications of improved simulated annealing algorithm in FBG sensor network [J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(6): 36-40.  
杨广学, 王景波. 改进模拟退火算法在FBG传感网络中的应用[J]. 光电技术应用, 2010, 25(6): 36-40.
- [21] Liu W H, Sui Q M. Wavelength multiplexing detection technique for FBG sensors based on PSO [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(6): 884-887.  
刘伟华, 隋青美. 基于粒子群算法的FBG峰值波长检测技术[J]. 半导体光电, 2007, 28(6): 884-887.
- [22] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.
- [23] Zhang C X. Particle swarm optimization based on time varying constrict factor [J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(23): 59-64.  
张成兴. 时变压缩因子粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(23): 59-64.