

引用格式: SHANG Qiufeng, YANG Genbei. Fiber Bragg Grating Demodulation Method Based on Improved Manta Ray Foraging Optimization Algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0906001

尚秋峰, 杨根辈. 基于改进的蝠鲼觅食算法的光纤布拉格光栅解调方法[J]. 光子学报, 2021, 50(9):0906001

# 基于改进的蝠鲼觅食算法的光纤布拉格光栅 解调方法

尚秋峰<sup>1,2,3</sup>, 杨根辈<sup>1</sup>

(1 华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

(2 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室, 河北 保定 071003)

(3 华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:** 针对光纤布拉格光栅在复用时, 由于光源带宽有限可能会导致光谱重叠, 进而影响解调精度的问题, 提出一种新型的光纤布拉格光栅重叠谱解调方法。该方法基于改进的蝠鲼觅食优化算法, 利用 Tent 混沌映射优化初始种群多样性, 采用差分进化算法优化个体位置更新策略, 解决了蝠鲼觅食优化算法易陷入局部最优的问题。对多个光纤布拉格光栅重叠谱进行仿真与实验, 结果表明: 所提方法能够准确解调出重叠光谱的中心波长, 即使在光谱畸变的情况下, 误差最大不超过 0.01 nm; 同时有效降低了陷入局部最优的概率, 提高了算法的稳定性、可靠性。

**关键词:** 信息光学; 光纤传感; 蝠鲼觅食优化; 光纤布拉格光栅; 波分复用; 波长解调

中图分类号: TN256

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215009.0906001

## Fiber Bragg Grating Demodulation Method Based on Improved Manta Ray Foraging Optimization Algorithm

SHANG Qiufeng<sup>1,2,3</sup>, YANG Genbei<sup>1</sup>

(1 Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

(2 Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

(3 Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

**Abstract:** When the fiber Bragg grating is multiplexing, the limited source bandwidth may cause spectral overlap, then affects the accuracy of demodulation. A new type of fiber Bragg grating overlapping spectrum demodulation method is proposed. This method is based on an improved manta ray foraging optimization algorithm. The Tent chaotic map is used to optimize the initial population, and the differential evolution algorithm is used to optimize the individual location update strategy, which solves the problem that the manta ray foraging optimization algorithm is easy to fall into the local optimum. The simulation and experimental results of multiple fiber Bragg gratings overlapping spectrum show that the proposed method can accurately demodulate the center wavelength of the overlapping spectrum, even in the case of spectral distortion, the maximum error does not exceed 0.01 nm; at the same time, it effectively reduces the

基金项目: 河北省自然科学基金(No.E2019502179), 国家自然科学基金(No.61775057)

第一作者: 尚秋峰(1968—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光电子与光传感。Email: lindashqf@126.com

通讯作者: 杨根辈(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感及信号处理。Email: 344435529@qq.com

收稿日期: 2021-03-08; 录用日期: 2021-05-11

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

probability of fall into local optimum, and improves the stability and reliability of the algorithm.

**Key words:** Information optics; Fiber optic sensor; Manta ray foraging optimization; Fiber Bragg grating; Wavelength division multiplexing; Wavelength demodulation

**OCIS Codes:** 060.3735; 280.4788; 060.4230; 150.1135

## 0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器具有高灵敏度、高准确性、不易受电磁干扰、小巧轻便、恶劣环境耐受能力强等优点,在航空航天、海洋监测、土木工程、电力系统、结构健康监测等领域中受到了广泛关注<sup>[1-6]</sup>。

FBG重叠谱解调技术是当今研究的热点之一,在有限的光谱范围内尽可能多的复用FBG,同时保证解调精度在可接受范围之内。2013年JIANG Hao等<sup>[7]</sup>利用传输矩阵理论构造理想光谱模型,使用了Swap-DE差分进化算法来计算布拉格波长,实验结果表明,波长检测误差通常小于0.2 pm。2015年QI Yuefeng等<sup>[8]</sup>利用模拟退火算法实现了不多于4个光栅的光谱重叠解调,波长识别误差小于10 pm。2018年CHEN Yong等<sup>[9]</sup>提出一种改进粒子群优化算法,以提高中心波长的识别精度,波长识别误差均小于1 pm。2019年ZHANG Mei等<sup>[10]</sup>研究了粒子群算法关键参数对FBG解调结果的影响。同年,CHEN Jing等<sup>[11]</sup>提出利用改进的峰值匹配分布式估计算法解调FBG重叠光谱,即使在大规模光谱完全重叠下,误差仍不超过10 pm。2020年LIU Yanfei等<sup>[12]</sup>提出了一种基于人工蜂群优化算法的光谱复用技术,解调误差不超过3.6 pm。2021年TONG Guoyi等<sup>[13]</sup>提出了基于海洋捕食者算法的FBG解调方法,在实现对多光谱重叠识别的同时又可以保证解调精度。但以上算法依然有不足之处,如易陷入局部最优、参数过多、全局搜索能力差、收敛速度慢。而易陷入局部最优的缺点导致算法稳定性不足,从而制约了智能启发式算法在实际工程中的应用。

本文提出了一种基于蝠鲼觅食优化算法(Manta Ray Foraging Optimization, MRFO)的FBG重叠光谱解调方法,与粒子群、模拟退火等智能启发式算法相比,原始MRFO算法局部搜索能力强,收敛速度快,参数少,但也存在易陷入局部最优的缺点。针对此缺点,利用Tent混沌映射优化初始种群多样性、差分进化算法优化个体位置更新策略,提高了重叠光谱解调的精度、稳定性,稳定性的提高有利于将算法早日投入到实际应用中。

## 1 改进的蝠鲼觅食优化算法

### 1.1 蝠鲼觅食优化算法

蝠鲼觅食优化算法是由ZHAO Weiguo等<sup>[14]</sup>在2020年提出的智能优化算法,具有优化速度快、局部搜索能力强、参数少等优点。该算法将蝠鲼种群的3种捕食策略进行数学建模,实现个体位置的更新。MRFO链式觅食策略更新位置可表示为

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} x_i^d(t) + r[x_{\text{best}}^d(t) - x_i^d(t)] + \alpha[x_{\text{best}}^d(t) - x_i^d(t)] & i = 1 \\ x_i^d(t) + r[x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)] + \alpha[x_{\text{best}}^d(t) - x_i^d(t)] & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x_i^d(t)$ 为第 $t$ 代的第 $i$ 个个体在 $d$ 维空间的位置; $r$ 为 $[0, 1]$ 的随机数; $x_{\text{best}}^d(t)$ 为第 $t$ 代的最优个体在 $d$ 维空间上的位置; $\alpha = 2r\sqrt{|\log(r)|}$ ,为权重因子。

旋风觅食策略更新位置表达式为

当 $\frac{t}{T} > \text{rand}$ 时

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} x_{\text{best}}^d(t) + r[x_{\text{best}}^d(t) - x_i^d(t)] + \beta[x_{\text{best}}^d(t) - x_i^d(t)] & i = 1 \\ x_{\text{best}}^d(t) + r[x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)] + \beta[x_{\text{best}}^d(t) - x_i^d(t)] & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\beta = 2\exp\left(r_1 \frac{T-t+1}{T}\right) \sin(2\pi r_1)$ ,为权重因子; $T$ 为最大迭代次数; $r_1$ 为 $[0, 1]$ 的随机数。

当 $\frac{t}{T} \leq \text{rand}$ 时

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} x_{\text{rand}}^d(t) + r[x_{\text{rand}}^d(t) - x_i^d(t)] + \beta[x_{\text{rand}}^d(t) - x_i^d(t)] & i = 1 \\ x_{\text{rand}}^d(t) + r[x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)] + \beta[x_{\text{rand}}^d(t) - x_i^d(t)] & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $x_{\text{rand}}^d(t) = \text{Lb}^d + r(\text{Ub}^d - \text{Lb}^d)$ , 表示第  $t$  代在  $d$  维空间的随机位置。  $\text{Ub}^d$ 、 $\text{Lb}^d$  为搜索空间的上限、下限。

翻筋斗觅食策略更新位置表达式为

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + S[r_2 x_{\text{best}}^d(t) - r_3 x_i^d(t)] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中,  $S$  为翻筋斗因子, 本文取 2;  $r_2$ 、 $r_3$  为  $[0, 1]$  的随机数。

MRFO 算法收敛速度快, 易早熟, 导致种群多样性差, 从而陷入局部最优解。为了提高种群多样性, 跳出局部最优, 提出一种差分进化蝠鲼觅食优化 (Differential Evolution Manta Ray Foraging Optimization, DEMRFO) 算法, 分别对 MRFO 算法的初始种群、翻筋斗觅食策略进行改进。

### 1.2 采用 Tent 混沌映射改进初始种群

Tent 混沌映射在迭代过程中存在不稳周期点, 例如 0.25, 0.5, 0.75 都会迭代到不动点  $0^{[15]}$ 。因此提出采用 Tent 混沌映射改进初始种群。 Tent 混沌映射:

$$z_{k+1} = \begin{cases} 2z_k + \text{rand}\left(u \frac{n-k}{n}\right) & 0 \leq z_k \leq 0.5 \\ 2(1-z_k) + \text{rand}\left(u \frac{n-k}{n}\right) & 0.5 < z_k \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $z_k$  为 Tent 混沌映射序列迭代第  $k$  次的值;  $n$  表示 Tent 混沌映射迭代总次数;  $k$  为当前迭代次数;  $\text{rand}$  为  $[0, 1]$  的随机数,  $u$  为扰动系数。

利用 Tent 混沌映射生成初始种群的步骤如下: 1) 设置 MRFO 算法种群数为  $N$ , 随机生成第一个个体; 2) 按式 (5) 迭代生成  $2N - 1$  个个体; 3) 计算  $2N$  个个体的适应度大小, 并选取适应度最好的  $N$  个个体作为初始种群。

### 1.3 采用差分进化算法改进觅食策略

差分进化算法通过变异、交叉、选择 3 种操作实现。设  $d$  维空间第  $t$  代的第  $i$  个体为  $\mathbf{X}_i^t = (x_{i,1}^t, x_{i,2}^t, \dots, x_{i,d}^t)$ 。

1) 变异操作, 该步骤需要在父代选取 3 个互不相同的个体, 通过式 (6) 生成变异个体  $\mathbf{U}_i^{t+1} = (u_{i,1}^{t+1}, u_{i,2}^{t+1}, \dots, u_{i,d}^{t+1})$ 。

$$\mathbf{U}_i^{t+1} = \mathbf{X}_{i,1}^t + F(\mathbf{X}_{i,2}^t + \mathbf{X}_{i,3}^t) \quad (6)$$

式中,  $F$  为缩放比例因子。

2) 交叉操作, 将式 (6) 所得的变异个体与原始个体进行交叉, 组成新个体  $\mathbf{V}_i^{t+1} = (v_{i,1}^{t+1}, v_{i,2}^{t+1}, \dots, v_{i,d}^{t+1})$

$$v_{i,d}^{t+1} = \begin{cases} u_{i,d}^{t+1} & \text{if } (\text{rand}(0, 1) \leq \text{CR} \text{ or } d = d_{\text{rand}}) \\ x_{i,d}^t & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\text{CR}$  为交叉概率;  $d_{\text{rand}}$  为  $(1, 2, \dots, d)$  的整数, 作用是保证至少有一位进行交叉操作。

3) 选择操作, 该步骤将原始个体  $\mathbf{X}_i^t$  与交叉后个体  $\mathbf{V}_i^{t+1}$  代入适应度函数  $f(x)$  中进行比较, 保留适应度较好的个体至下一代, 即

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{V}_i^{t+1} & \text{if } (f(\mathbf{V}_i^{t+1}) < f(\mathbf{X}_i^t)) \\ \mathbf{X}_i^t & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

利用差分进化算法<sup>[16]</sup>优化翻筋斗觅食策略步骤如下: 1) 根据翻筋斗觅食策略、差分进化算法分别更新个体位置并计算适应度函数; 2) 选择适应度函数值较小的位置作为新的个体位置。完整的算法流程图如图 1。

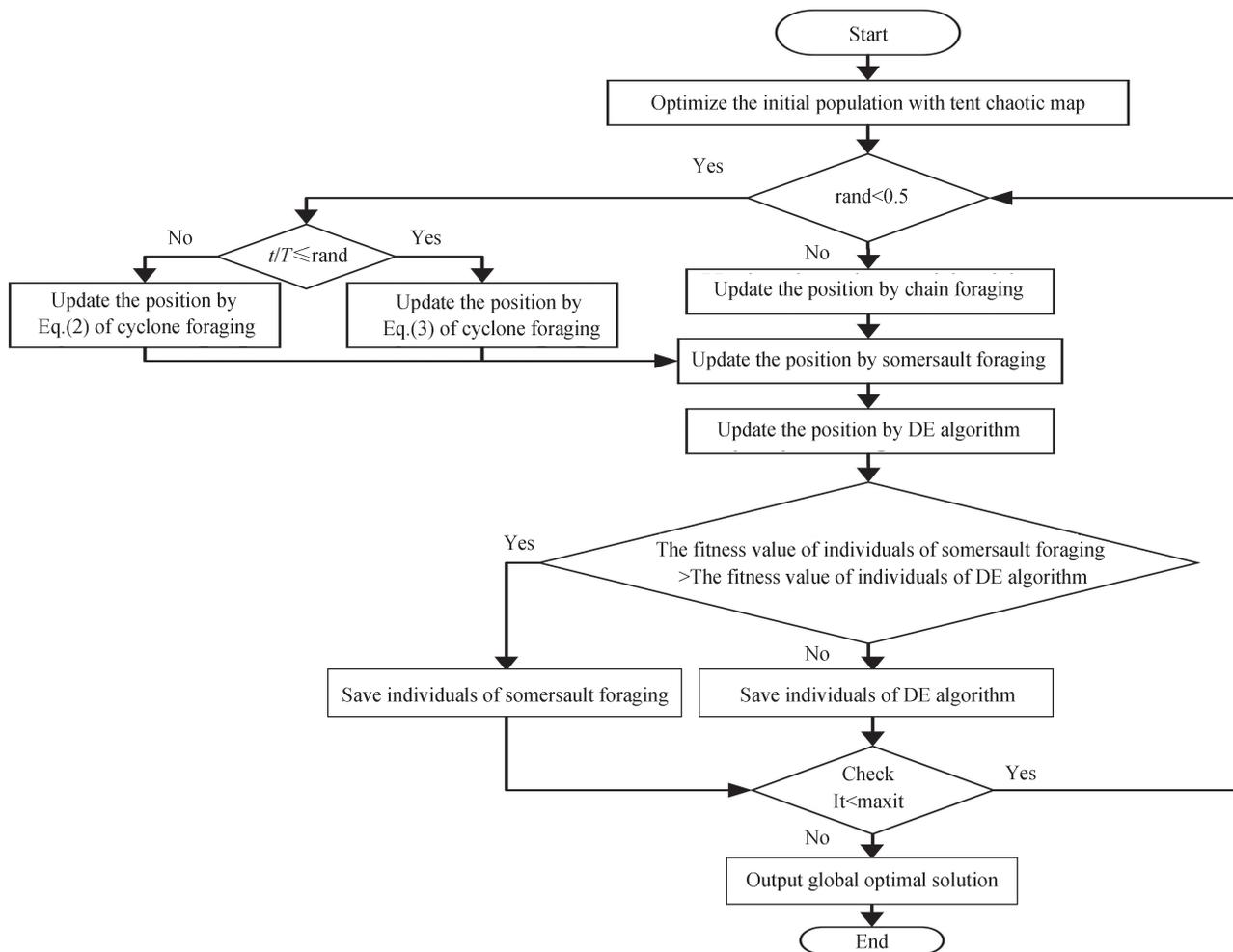


图1 DEMRFO 算法流程

Fig.1 Flowchart of DEMRFO algorithm

## 2 仿真结果与分析

对不重叠、部分重叠、完全重叠 3 种光谱重叠情况,利用 Matlab 分别做了 2 个 FBG、3 个 FBG、4 个 FBG 光谱重叠仿真。

MRFO 与 DEMRFO 参数均保持一致,种群个体数设为 50,迭代次数设为 20,搜索范围设为 [1543, 1546];Tent 混沌映射扰动系数  $u$  设为 0.005;差分进化算法的变异概率设为 0.5,交叉概率设为 0.5,迭代次数设为 10。由于智能算法具有随机性,因此每次仿真计算独立重复 10 次,并取平均值作为结果。

评价算法有效性的性能指标分别为平均误差和局部最优解个数。定义偏离设定中心波长  $\pm 20$  pm 定义为局部最优解。

### 2.1 FBG 解调系统

FBG 光谱复用原理如图 2,整个系统由宽带光源、隔离器、F-P(Fabry-Perot, F-P)滤波器、光耦合器、环形器、F-P 标准具、参考光栅、光电探测器、数据采集卡组成。此解调仪型号为微光 sm125 解调仪,波长分辨率为 5 pm。宽带光源发出的光经过环形器进入 FBG,部分光通过 FBG 反射回来再通过环形器反射到光电探测器中,经数据采集卡采集到反射光谱。 $n$  个近似高斯曲线的 FBG 反射光谱  $g_i(\lambda, \lambda_{Bi})$  叠加后可表示为

$$R(\lambda, \lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{Bn}) = \sum_{i=1}^n r_i \exp\left[-\frac{4(\lambda - \lambda_{Bi})^2}{B}\right] \quad (9)$$

式中,  $r_i$  和  $\lambda_{Bi}$  表示第  $i$  个 FBG 的反射率、中心波长,  $B$  表示 3 dB 带宽。为了从重叠光谱中解调出  $n$  个 FBG 的中心波长  $\lambda_{Bi}$ ,可构造如下理想光谱函数

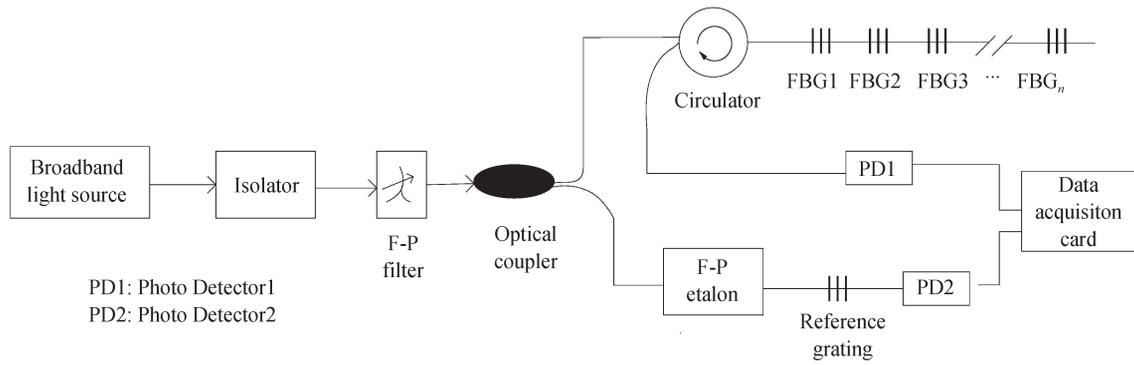


图2 FBG复用系统原理

Fig.2 Schematic of FBG multiplexing system

$$R_v(\lambda, S_1, S_2, \dots, S_n) = \sum_{i=1}^n g_i(\lambda, S_i) \quad (10)$$

式中,  $S_i$  表示构造函数中对应的第  $i$  个 FBG 的中心波长。将  $R(\lambda, \lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{Bn})$  与  $R_v(\lambda, S_1, S_2, \dots, S_n)$  做差并积分表示两者重合程度

$$G(\lambda, s_1, s_2, \dots, s_n) = \int_0^{\infty} [R(\lambda, \lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{Bn}) - R_v(\lambda, S_1, S_2, \dots, S_n)]^2 d\lambda \quad (11)$$

由式(11)可知,当且仅当  $(\lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{Bn}) = (S_1, S_2, \dots, S_n)$  时,适应度函数  $G(\lambda, s_1, s_2, \dots, s_n)$  最小,即理想光谱与仪器采集光谱的匹配程度达到最优。

## 2.2 2个FBG光谱重叠情况仿真

2个FBG光谱重叠的仿真计算中,FBG1的中心波长为1544.0 nm~1544.5 nm,步长为0.05 nm,FBG2的中心波长为1544.5 nm;FBG1、FBG2的反射率分别为0.9、0.7,3 dB带宽均为0.2 nm。2个FBG的重叠光谱如图3。

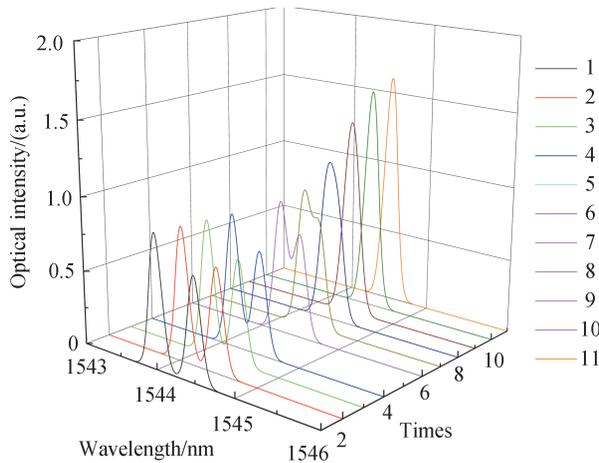


图3 2个FBG的重叠光谱

Fig.3 Combined spectrum of two FBGs

针对图3中由不重叠到完全重叠的11种2个FBG光谱重叠的情况,MRFO算法、DEMRFO算法解调结果如表1所示,MRFO算法最大误差为0.049 873 0 nm;DEMRFO算法解调结果最大误差为0.005 662 56 nm。由局部最优解个数可以看出随着重叠程度的增大,MRFO算法易陷入局部最优,而DEMRFO算法基本不受影响。对比可知,DEMRFO算法解调精度优于MRFO算法。

本文DEMRFO算法2个FBG波长误差的平均标准方差分别为1.23 pm、1.59 pm;文献[8]中2个FBG波长误差的平均标准方差为2.36 pm、1.93 pm。结果表明,本算法解调结果优于文献[8]的模拟退火算法。

表1 MRFO、DEMRFO算法解调结果  
Table1 Demodulation results of MRFO algorithm and DEMRFO algorithm

Times	MRFO/DEMRFO		MRFO/DEMRFO	
	Error/nm		Number of local optimal solution	
	FBG1	FBG2	FBG1	FBG2
1	0.003 143 7/0.000 001 1	0.000 091 2/0.000 000 9	0/0	0/0
2	0.000 020 5/0.000 000 4	0.002 177 5/0.000 000 3	0/0	0/0
3	0.000 024 5/0.000 000 6	0.000 043 3/0.000 000 1	0/0	0/0
4	0.000 925 6/0.000000 1	0.002 685 2/0.000 000 1	0/0	0/0
5	0.029 096 5/0.000000 2	0.030 606 7/0.000 000 6	1/0	1/0
6	0.022 674 2/0.000000 4	0.027 496 0/0.000 001 0	1/0	1/0
7	0.000 230 0/0.000000 5	0.001 913 5/0.000 000 02	0/0	1/0
8	0.049 873 0/0.000 000 1	0.068 897 6/0.000 000 4	4/0	4/0
9	0.025 621 6/0.000 010 9	0.034 437 9/0.000 001 3	2/0	3/0
10	0.021 940 5/0.004 366 1	0.028 870 2/0.005 662 7	5/1	5/1
11	0.000 151 4/0.000 150 9	0.000 158 9/0.000 196 1	0/0	0/0

2.3 3个FBG光谱重叠情况仿真

3个FBG光谱重叠的仿真计算中,光谱不重叠时,FBG1、FBG2、FBG3的中心波长分别为为1543.7 nm、1544.2 nm;1544.7 nm;光谱部分重叠时,FBG1、FBG2、FBG3的中心波长分别为为1544.3 nm、1544.5 nm;1544.7 nm;光谱完全重叠时,均为1544.5 nm。FBG1、FBG2、FBG3的反射率分别为0.9、0.7、0.6,3 dB带宽均为0.2 nm。3个FBG的重叠光谱如图4。

针对图4中不重叠、部分重叠、完全重叠3种3个FBG光谱重叠的情况,MRFO算法、DEMRFO算法解

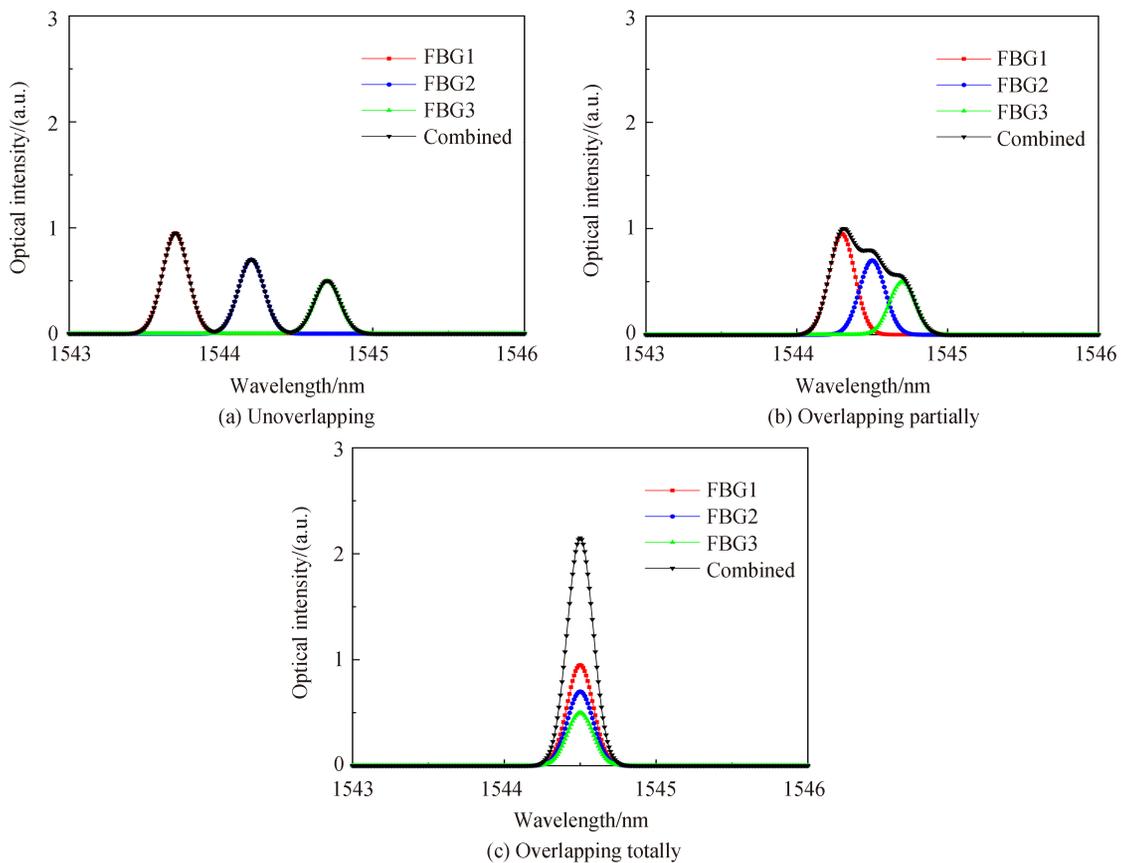


图4 3个FBG的重叠光谱  
Fig.4 Combined spectrum of three FBGs

调结果如表2所示,MRFO算法最大误差为0.153 959 9 nm;DEMRFO算法解调结果最大误差为0.000 544 2 nm。与2个FBG重叠相比,可以看出随着复用FBG个数的增加,MRFO算法陷入局部最优的解增加。

表2 MRFO、DEMRFO算法解调结果  
Table 2 Demodulation results of MRFO algorithm and DEMRFO algorithm

Degree of overlap	MRFO/DEMRFO			MRFO/DEMRFO		
	Error/nm			Number of local optimal solution		
	FBG1	FBG2	FBG3	FBG1	FBG2	FBG3
Non	0.101 787 5/	0.047 299 1/	0.153 959 9/	2/0	5/0	4/0
	0.000 002 0	0.000 000 1	0.000 001 1			
Partially	0.059 250 0/	0.093 832 7/	0.008 835 9/	4/0	4/0	2/0
	0.000 006 3	0.000 014 0	0.000 011 7			
Totally	0.000 047 9/	0.000 780 4/	0.001 024 3/	0/0	0/0	0/0
	0.000 171 9	0.000 544 2	0.000 427 3			

本文DEMRFO算法3个FBG波长平均误差,最小值为0.000 1 pm,最大值为0.544 2 pm。文献[13]中PSO算法3个FBG波长平均误差,最小值为6.3 pm,最大值为7.3 pm;MPA算法3个FBG波长平均误差,最小值为4.3 pm,最大值为5.6 pm。结果表明,本算法解调结果优于文献[13]的粒子群算法和海洋捕食者算法。

2.4 4个FBG光谱重叠情况仿真

4个FBG光谱重叠的仿真计算中,光谱不重叠时,FBG1、FBG2、FBG3、FBG4的中心波长分别为1 543.6 nm、1 544.1 nm;1 544.6 nm、1 545.1 nm;光谱部分重叠时,FBG1、FBG2、FBG3、FBG4的中心波长分别为1 544.1 nm、1 544.3 nm;1 544.5 nm、1 545.7 nm;光谱完全重叠时,均为1 544.5 nm。FBG1、FBG2、FBG3、FBG4的反射率分别为1、0.78、0.52、0.3,3 dB带宽均为0.2 nm。重叠光谱如图5。

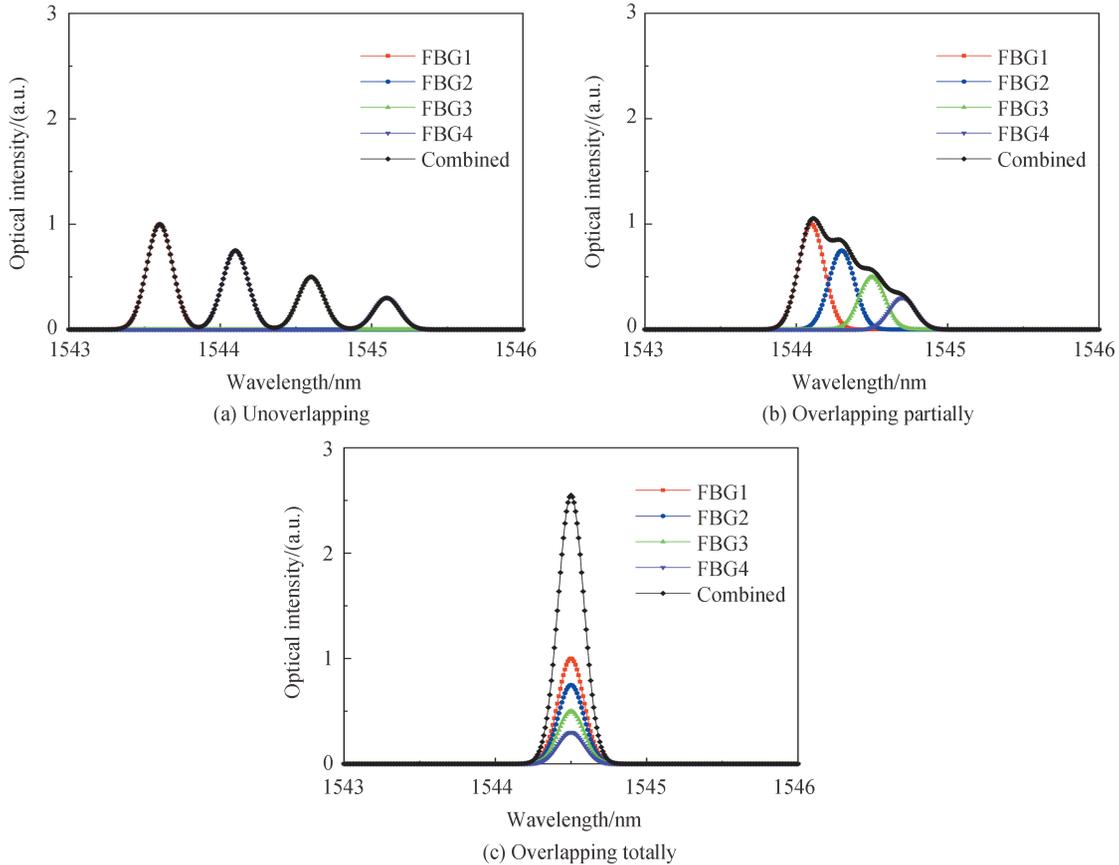


图5 4个FBG的重叠光谱  
Fig.5 Combined spectrum of four FBGs

针对图5中不重叠、部分重叠、完全重叠3种4个FBG光谱重叠的情况,MRFO算法、DEMRFO算法解调结果如表3所示,MRFO算法最大误差为0.344 9115 nm;DEMRFO算法解调结果最大误差为0.001 812 6 nm。

表3 MRFO、DEMRFO算法解调结果  
Table3 Demodulation results of MRFO algorithm and DEMRFO algorithm

Degree of overlap	MRFO/DEMRFO				MRFO/DEMRFO			
	Error/nm				Number of local optimal solution			
	FBG1	FBG2	FBG3	FBG4	FBG1	FBG2	FBG3	FBG4
Non	0.149 841 4	0.099 501 1	0.147 907 2	0.344 911 5	4/0	4/0	6/0	7/0
	/0.000 008 8	/0.000 001 5	/0.000 009 6	/0.000 013 7				
Partially	0.066 064 8	0.036 541 8	0.084 892 9	0.274 769 0	4/0	7/0	9/0	9/0
	/0.000 027 3	/0.000 028 6	/0.000 160 0	/0.000 067 7				
Totally	0.004 172 9	0.002 208 3	0.001 030 2	0.006 372 3	0/0	1/0	2/0	3/0
	/0.000 347 1	/0.000 035 5	/0.000 483 9	/0.001 812 6				

本文DEMRFO算法4个FBG波长平均误差,最小值为0.000 1 pm,最大值为0.544 2 pm。文献[13]中PSO算法3个FBG波长平均误差,最小值为8.3 pm,最大值为10.3 pm;MPA算法3个FBG波长平均误差,最小值为5.6 pm,最大值为7.6 pm。结果表明,本算法解调结果优于文献[13]的粒子群算法和海洋捕食者算法。

### 3 实验与讨论

采用如图6所示实验系统采集FBG光谱,采集到光谱后利用Matlab进行仿真计算。FBG1、FBG2的标称中心波长分别为1 536.875 nm、1 537.426 nm;FBG1、FBG2反射率分别为1,0.94,3 dB带宽均为0.25 nm。实验采集的2个FBG的重叠光谱如图7。

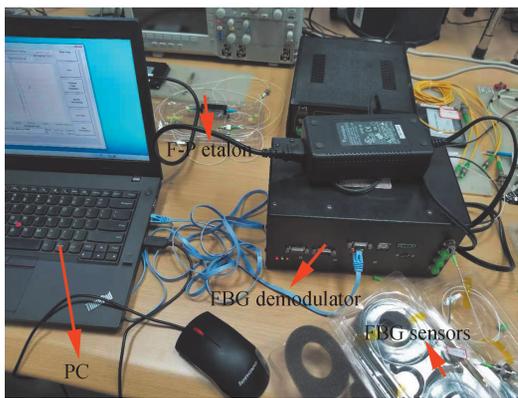


图6 实验系统  
Fig.6 Experimental system

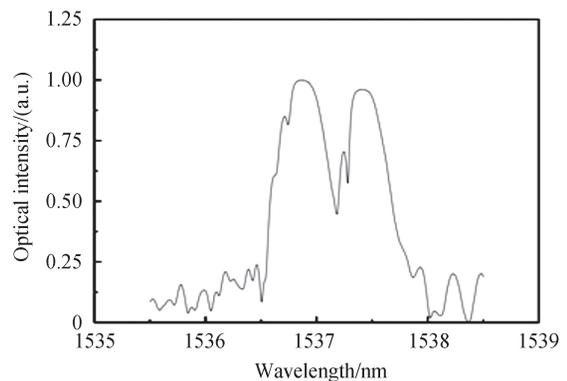


图7 2个FBG的重叠光谱  
Fig.7 Combined spectrum of two FBGs

针对图7中2个FBG光谱部分重叠的光谱情况,2种算法解调结果如表4。MRFO算法解调结果最大误差为0.114 223 1 nm;DEMRFO算法解调结果最大误差为0.007 617 9 nm。即使在FBG左侧光谱畸变的情况下发生重叠,DEMRFO算法的解调误差最大仍不超过0.01 nm;且DEMROFO算法能够有效降低陷入局部最优解的概率。

表4 2种算法解调结果  
Table 4 Demodulation results of MRFO algorithm and DEMRFO algorithm

	FBG1		FBG2	
	Error/nm	Number of local optimal solution	Error/nm	Number of local optimal solution
MERO	0.114 223 1	2	0.103 1363	2
DEMRFO	0.004 607 3	0	0.007 6179	0

## 4 结论

本文提出了一种基于DEMRFO算法的FBG重叠光谱解调方法。与原始蝠鲼觅食优化算法相比,DEMRFO算法能够有效降低陷入局部最优解的概率同时提高解调精度,在FBG光谱畸变的情况下,解调误差最大不超过0.01 nm。算法陷入局部最优解的概率与光谱重叠程度有关。当光谱重叠程度增大时,陷入局部最优的概率也就越大;当光栅完全重叠时,算法不会陷入局部最优。仿真结果与实验结果表明,所提DEMRFO算法具有较高的解调精度,特别是在光谱畸变情况下,对实际工程应用具有重要意义。

### 参考文献

- [1] SINHA R, HERNANDEZ FU, HE C, et al. Development and validation of a novel fibre-optic respiratory rate sensor (FiRRS) integrated in oxygen delivery devices[J]. *Journal of Physics D-applied Physics*, 2021, 54(12): 124002.
- [2] LIU Chunlong, ZHANG Zhengyi, LI Hongcai, et al. Flow/pressure/temperature simultaneous measurement technology in hydraulic system based on FBG[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(11): 16-22.  
刘春桐, 张正义, 李洪才, 等. 基于FBG的液压系统中流量/压力/温度同时测量技术[J]. *光子学报*, 2016, 45(11): 16-22.
- [3] GOOSSENS S, BERGHMANS F, KHODAEI ZS, et al. Practicalities of BVID detection on aerospace-grade CFRP materials with optical fibre sensors[J]. *Composite Structures*, 2021, 259: 113243.
- [4] LIU Y C, MATAIRA R, BADCOCK R, et al. Application of epoxy-bonded FBG temperature sensors for high-temperature superconductor-coated conductor quench detection[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, 31(2): 4700308.
- [5] LIU Rizhao, CHEN Ming, ZHENG Jiajin, et al. Study on preparation and properties of high temperature regenerated fiber Bragg gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(7): 0706001.  
刘日照, 陈明, 郑加金, 等. 高温热重生光纤布拉格光栅制备及其性能研究[J]. *光子学报*, 2020, 49(7): 0706001.
- [6] WEI Cong, ZHOU Ciming, CHEN Xi, et al. FBG demodulation method based on frequency shift interference digital mixing algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12): 1206001.  
魏聪, 周次明, 陈希, 等. 基于频移干涉数字混频法的FBG解调方法[J]. *光子学报*, 2020, 49(12): 1206001.
- [7] JIANG Hao, CHEN Jing, LIU Tundong, 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.
- [8] QI Yuefeng, LI Cailing, JIANG Peng, et al. Spectral shape multiplexing technology of fiber Bragg gratings using simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 90-96.  
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): 90-96.
- [9] CHEN Yong, CHENG Yanan, LIU Huanlin. 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.
- [10] ZHANG Mei, ZHANG Wei, ZHANG Peng, 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.
- [11] CHEN Jing, LIN Yating, ZHOU Qingxu, 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.
- [12] LIU Yanfei, LI Zhibin. Spectral multiplexing technology based on artificial swarm optimization algorithm[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(1): 52-57.  
刘雁飞, 李志斌. 基于人工蜂群优化算法的光谱形复用技术[J]. *光通信技术*, 2021, 45(1): 52-57.
- [13] TONG Guoyi, LIU Binhui, HUANG Linyi, et al. FBG demodulation method based on meta-heuristic algorithm[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(3): 23-27.  
童国炜, 刘斌辉, 黄林轶, 等. 基于元启发算法的FBG解调方法[J]. *光通信技术*, 2021, 45(3): 23-27.
- [14] ZHAO Weiguo, ZHANG Zhenxing, WANG Liying. Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 87: 103300.
- [15] TAN Guangxing, ZHU Yanfei, MAO Zongyuan. Adaptive clone selection optimization algorithm based on Hénon map[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, (9): 73-76.  
谭光兴, 朱燕飞, 毛宗源. 基于Hénon映射的自适应克隆选择优化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2006, (9): 73-76.
- [16] STORN R, PRICE K. Differential evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341-359.