

激光与光电子学进展

基于 CWT-PSO 算法的光纤布拉格光栅传感网络
重叠光谱分类及解调胡劲华^{1,2*}, 郑炳理¹, 邓玉静¹, 任丹萍^{1,2}, 赵继军^{1,2}¹河北工程大学信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038;²河北省安防信息感知与处理重点实验室, 河北 邯郸 056038

摘要 提出一种新型光纤布拉格光栅(FBG)传感网络系统,根据监测区域的优先级灵活配置传感器数目,从而提高带宽的利用效率,增加重点区域的传感器数量。由于各通道的光谱重叠程度存在差异性,实现重叠光谱的快速分类和精准解调尤为重要。基于连续小波变换(CWT)-粒子群优化(PSO)算法实现了FBG传感网络的重叠光谱分类及解调。首先利用CWT分割光谱信号,根据重叠光谱的特征完成重叠光谱分类;然后使用PSO解调多个FBG重叠的光谱。仿真结果表明,所提方法有效降低了解调时间,且解调误差最大不超过10 pm。该研究工作为实现大容量FBG传感网络重叠光谱的快速精准解调提供了新思路。

关键词 光纤光学与光通信; 光纤布拉格光栅; 重叠光谱分类; 连续小波变换; 粒子群优化算法

中图分类号 TN911

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222432

Overlapping Spectrum Classification and Demodulation of Fiber Bragg
Grating Sensing Network Based on CWT-PSO AlgorithmHu Jinhua^{1,2*}, Zheng Bingli¹, Deng Yujing¹, Ren Danping^{1,2}, Zhao Jijun^{1,2}¹School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering,
Handan 056038, Hebei, China;²Hebei Key Laboratory of Security Protection Information Sensing and Processing, Handan 056038, Hebei, China

Abstract In this study, we developed a novel fiber Bragg grating (FBG) sensing network system that flexibly configures the number of sensors according to the priority of the monitored area, thus, improving the bandwidth utilization efficiency and increasing the number of sensors in the priority area. Because of the differences in the degree of spectral overlap of each channel, it is essential to achieve fast classification and accurate demodulation of overlapping spectra. The continuous wavelet transform (CWT)-particle swarm optimization (PSO) algorithm was used to achieve the overlapping spectrum classification and demodulation of the FBG sensing network. First, CWT was used to segment the spectral signals, and the overlapping spectra were classified according to their characteristics. Then, PSO was used to demodulate multiple FBG overlapping spectra. The simulation results show that the proposed method effectively decreases the demodulation time, and the maximum demodulation error is within 10 pm. This study provides an approach for fast and accurate demodulation of overlapping spectra in large-capacity FBG sensing networks.

Key words fiber optics and optical communication; fiber Bragg grating; overlapping spectrum classification; continuous wavelet transform; particle swarm optimization algorithm

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有灵敏度高、耐高温、抗腐蚀、抗电磁干扰、易于组网复用等优点,已经

被广泛应用于大型建筑物的结构健康监测^[1-3]、环境污染监测^[4]和管道泄漏监测^[5]等领域。近年来,FBG传感系统与多种复用技术相结合实现多点监测^[6],比如波分复用(WDM)、时分复用(TDM)^[7]、空分复用

收稿日期: 2022-08-31; 修回日期: 2022-10-31; 录用日期: 2022-11-08; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(61905060)、河北省自然科学基金(F2022402007)、河北省高等学校科学技术研究项目重点项目(ZD2021019)

通信作者: *hujh84@hebeu.edu.cn

(SDM)等。基于 WDM 的 FBG 传感系统中,FBG 传感器复用数目受每个 FBG 传感器波长工作范围与光源总带宽的限制^[8-9]。随着大容量 FBG 传感网络技术的迅速发展,FBG 复用数目也逐渐增多,相邻光谱越容易发生重叠。因此,在大容量 FBG 传感系统中使用常规寻峰算法难以实现重叠光谱的精准解调。

小波理论在 FBG 重叠光谱的分类与解调上引起人们广泛关注。其中,小波脊线寻峰算法能快速有效地解决 FBG 反射信号的波峰重叠问题^[10]。基于连续小波变换(CWT)的多峰 FBG 反射谱分割方法能有效分割无重叠峰与部分重叠峰^[11]。然而,CWT 法难以分离完全重叠峰,其峰值定位能力有限。近年来,一些常用的优化算法如遗传算法^[12-13]、模拟退火算法^[13-14]、差分进化算法^[15-16]与粒子群优化(PSO)算法^[17-19]等被相继应用到传感解调系统中,重点提升重叠光谱的解调精度。此类优化方法的核心思想是将波长检测问题转化为函数优化问题^[20],用重构光谱信号来不断逼近实际采样光谱信号,再通过比较重构光谱信号与采样光谱信号之间的最小差异来确定每个 FBG 传感器的中心波长。上述方法的缺点是随着光纤光栅传感器数量的增加,光谱解调的时间不断增加;同时缺乏对光谱重叠程度的精准分类,不利于光谱的精准快速解调。

传统的 FBG 光谱解调算法假定每个链路中的 FBG 重叠光谱程度不存在差异性;实际应用过程中,每个链路传感器的数量和传输的容量存在差异性,在重点区域通常增加 FBG 的数量,这样必然导致不同链路的相邻 FBG 之间的重叠光谱存在差异性。这样就

使得单一的解调算法难以实现 FBG 传感系统的快速精准解调。本文提出一种基于 CWT-PSO 法的重叠光谱分类及精准解调方法,并应用于带宽灵活的 FBG 传感系统。首先选择合适尺度的一阶高斯小波基函数对光谱信号进行 CWT,利用变换信号的极值点分割原始信号,并依据重叠光谱的特征进行重叠光谱分类。然后使用 PSO 算法解调完全重叠光谱,通过设置合适的粒子初始位置与粒子更新区域减少 PSO 算法的迭代次数。仿真结果表明,该方法不仅可以判断不同信道内 FBG 反射光谱的重叠程度,还可以实现多个 FBG 重叠光谱的快速解调,其解调误差在 10 pm 以内。

2 重叠光谱分类解调与算法描述

本文提出一种新型的 FBG 传感系统,其结构如图 1 所示。其基本原理为宽带光源发射的光信号经过 3 dB 光耦合器和一个光分路器,进入 FBG 传感器阵列,每条信道上的 FBG 反射光反向传输到光谱分析仪(OSA)进行采样,再将采集到的光谱数据传入计算机(PC)进行解调。为了提高带宽的利用效率,根据所监测区域的优先级,不同光纤阵列灵活配置 FBG 数量,增加对重点监测区域的传感信息的采样。假定 FBG 阵列 1 附近为重点监测区域,故采用多个传感器的谱形复用的形式,提高带宽的利用效率,因此,重叠光谱的重叠程度相比其他两个区域较为严重。FBG 阵列 3 为普通的监测区域,该阵列中传感器之间带宽间隔较大,不存在光谱重叠问题。为便于区分不同阵列的反射光谱信号,可以调控衰减器控制反射谱不同幅值加以区分。

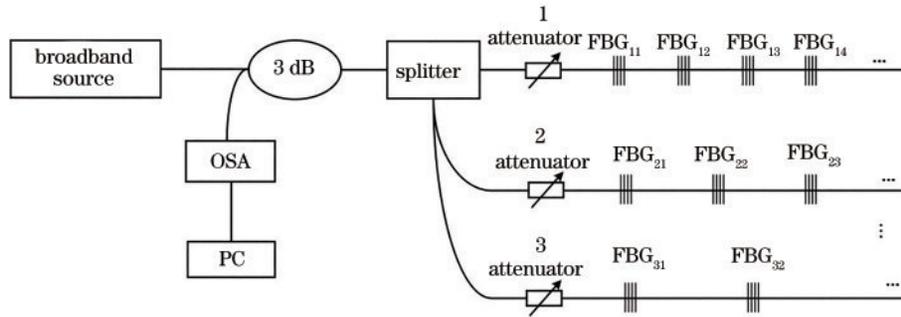


图 1 节点数灵活配置的 FBG 传感系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FBG sensing system with flexible number of nodes

光纤阵列上第 i 个 FBG 的反射光谱 $g_i(\lambda - \lambda_{Bi})$ 表达式为

$$g_i(\lambda - \lambda_{Bi}) = \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_{Bi}}{\Delta \lambda_i} \right)^2 \right], \quad (1)$$

式中:假定第 i 个 FBG 的 3 dB 带宽 $\Delta \lambda_i = 0.2 \text{ nm}$; λ_{Bi} 是通道中第 i 个 FBG 的中心波长。光纤阵列上的 FBG 反射光谱信号 $x(\lambda)$ 是每一个 FBG 反射谱叠加的总和,可以表示为

$$x(\lambda) = \sum_i r_i g_i(\lambda - \lambda_{Bi}) + N(\lambda), \quad (2)$$

式中: r_i 是通道中第 i 个 FBG 的反射峰值, $r_i \in [0, 1]$; $N(\lambda)$ 是系统噪声,通常是高斯白噪声。

随着同一阵列内 FBG 复用数目的增多,相邻光栅之间中心波长间隔变小,光谱的重叠程度会越来越大,因此,每个阵列内 FBG 反射光谱重叠程度不同。为了便于快速精准实现整个传感器系统的光谱解调,选择先对重叠光谱分类,然后再解调。为实现重叠光谱的分类及解调,需要先对光谱信号进行分割。CWT 法不仅能有效分割部分重叠光谱^[11],还能提取弱 FBG 反射谱信号。CWT 公式为

$$(T^{\text{wav}} x)(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int (t) \psi_{a,b} \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 是原始信号; $\psi_{a,b}(t)$ 是小波基函数; a 和 b 分

别代表尺度因子和比例因子; $(T^{wav}x)(a, b)$ 是经过处理的信号。基于 Gauss 1 小波基的 CWT 可用来分割具有部分重叠的光谱信号^[11]。

CWT 信号的极值点可以用来分割光谱信号: 极小值点为左分割点, 极大值点为右分割点, 两点之间的

水平距离即为光谱的分割长度(分割长度记为 L)。尺度因子 a 为原始信号长度除以 j , 即 $a = \text{length}(\text{signal})/j$ 。其中 j 是从 1 开始的自然数^[11]。如图 2 所示, 随着尺度因子的减小(j 的增加), CWT 分割法对部分重叠峰的峰值分离能力越强。

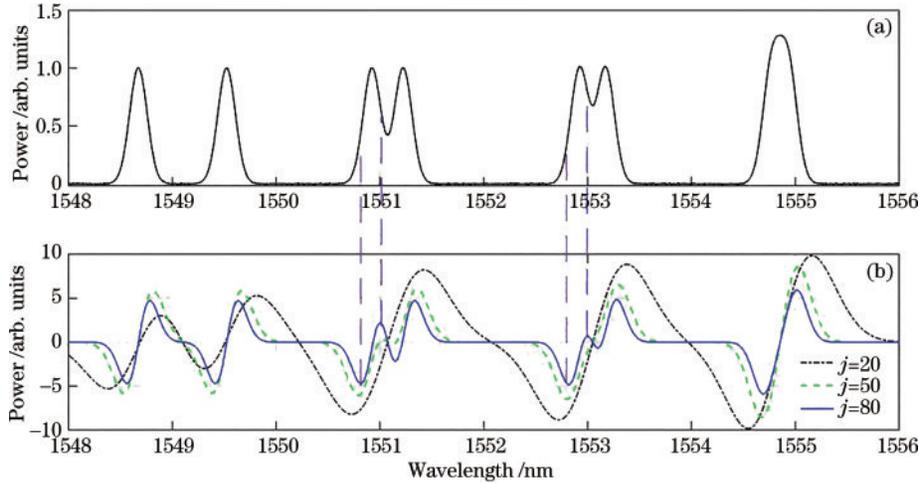


图 2 FBG 重叠光谱信号及其 CWT 信号。(a) 不同重叠程度的 FBG 光谱信号; (b) 不同尺度因子下的 CWT 信号

Fig. 2 FBG overlapping spectral signals and its CWT signals. (a) FBG spectral signals with different degrees of overlap; (b) CWT signals under different scale factors

对 FBG 光谱信号进行分割后, 实际采样的光谱一般分成以下三种情况: 完全重叠、部分重叠和不重叠。为实现重叠光谱分类, 高斯拟合法被用来获取分割光谱的检测波长 λ'_{bi} 和光谱的检测峰值 r'_i , L 与 r'_i 是用来实现重叠光谱分类的 FBG 反射谱特征。当 L 过大或 r'_i 过大时, 该 FBG 分割光谱为完全重叠光谱。此外, 再考虑无重叠光谱与部分重叠光谱之间的区分。

图 3 显示了不同重叠程度下 CWT 信号的极值点变化。 L_L 和 L_R 分别为左、右分割点纵坐标的绝对值, 即两点与零点间的垂直距离。设置重叠参数 $m = L_L/L_R$ 来表示部分重叠光谱的重叠程度。当 $0.88 < m < 1.25$ 时, 光谱无重叠或重叠较小, 光谱的中心波长即为检测波长; 当 $m < 0.88$ 或 $m > 1.25$ 时, 光谱出现部

分重叠, 使用下式对部分重叠光谱的检测波长进行波长校正:

$$\lambda'_{bi} = \begin{cases} \lambda_{bi} - (m - 1)/(m + 1)(\Delta\lambda/10) & m \geq 1.25 \\ \lambda_{bi} & 0.88 < m < 1.25 \\ \lambda_{bi} + (1 - m)/(m + 1)(\Delta\lambda/10) & m \leq 0.88 \end{cases}, \quad (4)$$

当 $m < 0.2$ 或 $m > 5$ 时, 光谱出现严重重叠, 检测误差超出校正公式的校正范围, 需要更精准的解调方法: 基于 PSO 算法的解调。使用 PSO 算法解调重叠光谱时, 利用 $g_i(\lambda - \lambda_{bi})$ 构造一个理论的 FBG 传感系统反射光谱函数 $R(s)$:

$$R(s) = \sum_i r_i g_i(\lambda - s_i), \quad (5)$$

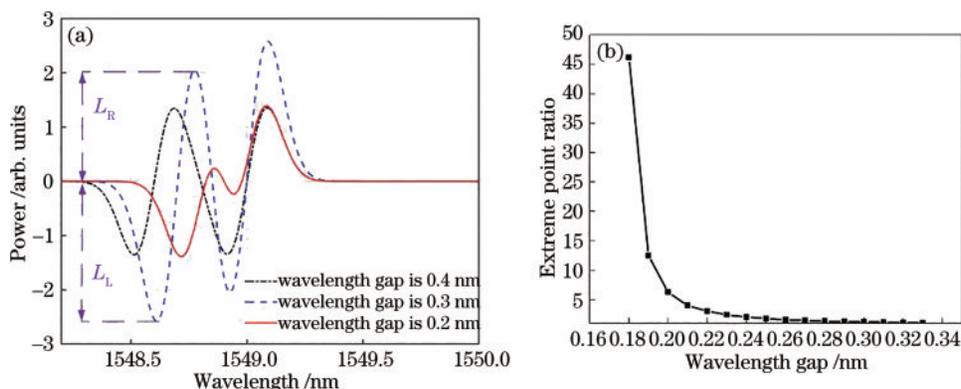


图 3 不同重叠程度下 CWT 信号的极值点变化。(a) 部分重叠光谱的 CWT 信号极值点在不同重叠程度下的变化; (b) 不同中心波长间距下的极值点比值

Fig. 3 Change of extreme points of CWT signal under different degrees of overlap. (a) Extreme points of CWT signal of partially overlapped spectra vary with different degrees of overlap; (b) ratio of extreme points at different center wavelength gaps

式中, s_i 为重构 FBG 反射谱的中心波长。上述原始光谱与合成谱的方差表示为

$$G(s) = \sum_{k=1}^k [x(\lambda) - R(s)]^2, \quad (6)$$

式中: $G(s)$ 为优化目标函数; k 为光谱采样点数。利用 PSO 算法得到最小的 $G(s)$, 当 $G(s)$ 最小时, s_i 即为 FBG 光谱的中心波长。

为提高 PSO 算法的解调速度, 以较小的迭代次数得到较为精准的检测结果, 以检测波长 λ'_{Bi} 为粒子的初始位置、光谱的分割区域为粒子的更新区域。再根据粒子速度和位置更新公式更新每个粒子, 从而产生新的解。通过粒子的不断迭代, 最终获得全局最优解, 即 FBG 反射光谱的中心波长。粒子的速度和位置表达式为

$$v_{p,q}(t+1) = \omega v_{p,q}(t) + c_1 \text{rand}_1 [p_{\text{best}_{p,q}} - x_{p,q}(t)] + c_2 \text{rand}_2 [g_{\text{best}_{p,q}} - x_{p,q}(t)], \quad (7)$$

$$x_{p,q}(t+1) = x_{p,q}(t) + v_{p,q}(t+1), \quad (8)$$

式中: $p=1, \dots, Z$ (Z 为种群规模); $q=1, \dots, D$ (D 为空间维度); t 为当前迭代次数; ω 为权重因子, $\omega \in [0, 1]$; c_1 和 c_2 分别为自我学习因子、社会学习因子, $c_1 \in [0, 2]$, $c_2 \in [0, 2]$; $p_{\text{best}_{p,q}}$ 与 $g_{\text{best}_{p,q}}$ 分别为个体最优值、全局最优值; rand_1 、 rand_2 为 0 到 1 之间的随机数。

本文提出的 CWT-PSO 法实现具体过程如下:

- 1) 算法开始, 建立重叠光谱数据;
 - 2) 利用基于 Gaus 1 小波基的 CWT 处理信号, 并对 CWT 信号进行平滑操作;
 - 3) 使用 CWT 信号的极值点分割光谱信号, 并获取分割长度 L 和重叠参数 m ;
 - 4) 利用高斯拟合法提取分割光谱的中心波长 λ'_{Bi} 和 FBG 的反射峰值 r'_i ;
 - 5) 依据光谱的重叠程度对光谱进行分类: 如果 $L > 0.24$ 或 $r'_i > 1.5$, 该光谱为完全重叠光谱, 转入步骤 8); 否则为无重叠光谱或部分重叠光谱, 进入下一步;
 - 6) 根据所设重叠参数 m 的大小来判光谱的重叠程度, 若 $0.83 < m < 1.2$, 该光谱无重叠或重叠程度较小, 所测波长即为光谱波长, 输出检测结果; 否则光谱为部分重叠光谱, 转入下一步;
 - 7) 如果 $0.2 < m < 5$, 根据式 (4) 对部分重叠光谱的检测波长进行校正, 并输出校正后的结果; 否则, 该光谱为严重重叠光谱, 转入步骤 8);
 - 8) 初始化 PSO 算法参数, 将检测波长作为粒子的初始位置, 并设置最大迭代次数、种群规模、空间维度等参数;
 - 9) 利用粒子群优化算法解调完全重叠光谱的中心波长, 输出检测结果;
 - 10) 算法结束。
- 提出算法流程图如图 4 所示。

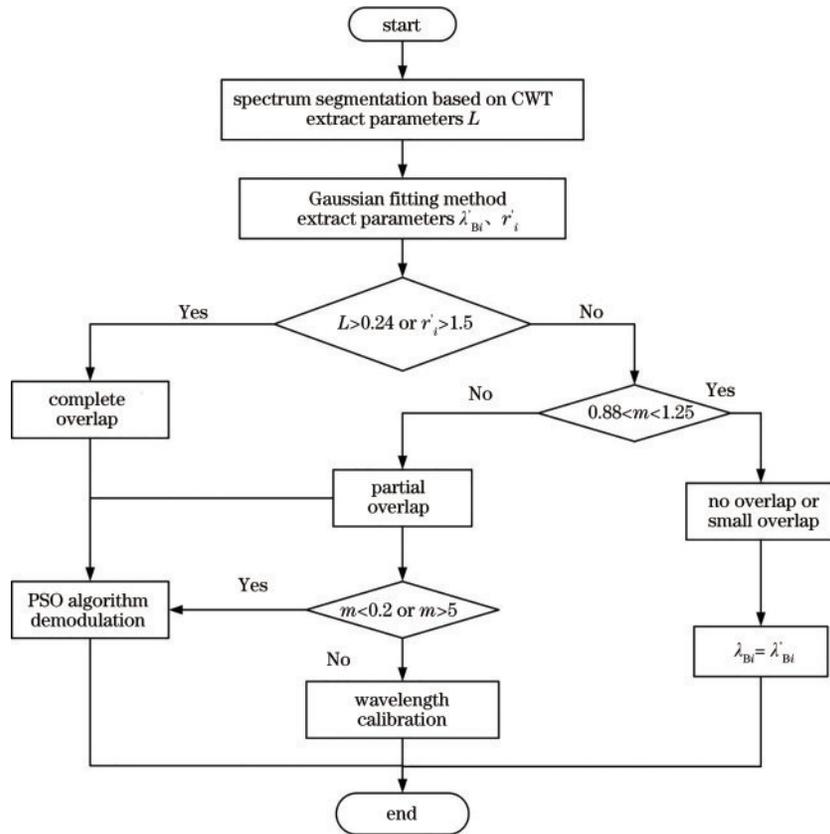


图 4 提出算法流程图

Fig. 4 Flow chart of proposed algorithm

3 仿真验证与结果分析

本文使用 Matlab2020b 来模拟具有多种重叠状态的多峰光谱信号,该信号包含多个不同重叠程度的光谱,并叠加有 30 dB 的高斯白噪声。其中设置的波长范围从 1548 nm 到 1556 nm,采样间隔为 0.002 nm。

为设置合适的参数,分析迭代次数、种群规模与权重因子三种参数对解调误差的影响。首先设置一个

FBG 重叠光谱,再控制变量进行仿真与分析,如图 5(a)所示;保持种群规模与权重因子不变,计算最大迭代次数变化下的 CWT-PSO 法解调误差,如图 5(b)所示;保持最大迭代次数与权重因子不变,计算种群规模变化下的 CWT-PSO 法解调误差,如图 5(c)所示;保持种群规模与最大迭代次数不变,计算权重因子变化下的 CWT-PSO 法解调误差,如图 5(d)所示。

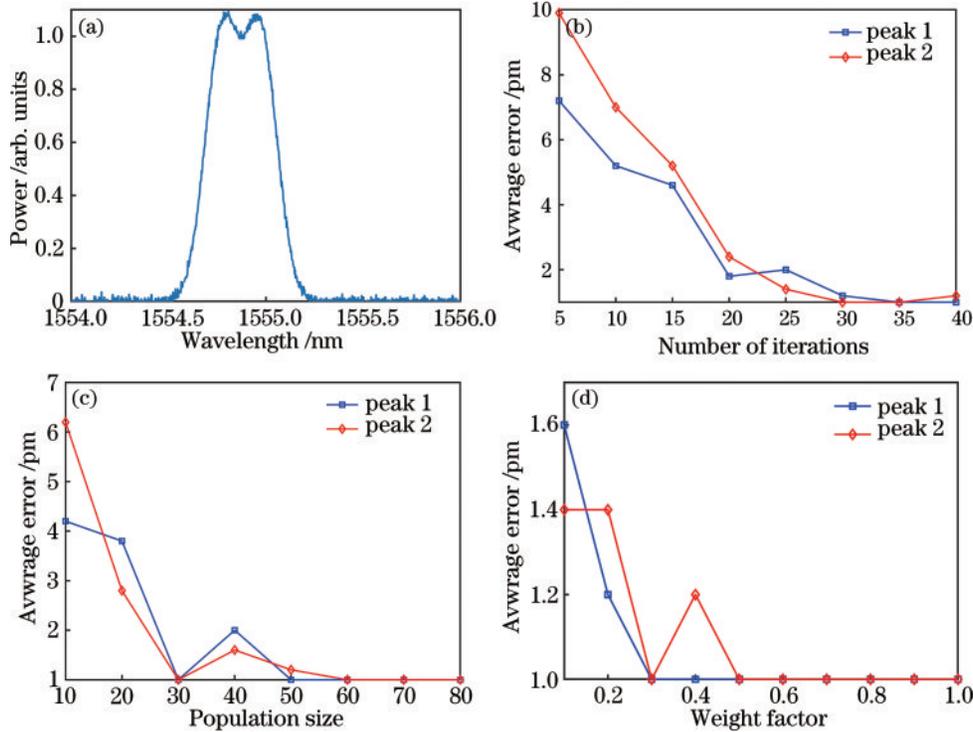


图 5 不同参数对解调误差的影响。(a)不同重叠程度下的 FBG 重叠光谱信号;(b)不同迭代次数下的平均检测误差;(c)不同种群规模下的平均检测误差;(d)不同权重因子下的平均检测误差

Fig. 5 Influence of different parameters on demodulation error. (a) FBG spectral signals under different degrees of overlap; (b) average detection error under different iterations; (c) average detection error under different population sizes; (d) average detection error under different weight factors

当迭代次数为 30 时,CWT-PSO 法基本完全收敛,说明该算法具有良好的收敛性。当种群规模为 60 时,CWT-PSO 法可以精准地识别出 FBG 重叠光谱的中心波长。当权重因子为 0.6 时,CWT-PSO 法的检测误差在 1 pm 以内。为确保 CWT-PSO 法能精准地解调完全重叠光谱,将迭代次数设置为 50,种群规模设置为 80,权重因子设置为 0.8。

仿真验证了 FBG 光谱重叠下的光谱识别能力与波长解调精度。假定三个阵列上 FBG 复用数目不同:通道 1 上的 FBG 复用数目最多,光谱容易发生部分重叠与严重重叠;通道 2 上的 FBG 复用数目较少,光谱可能发生部分重叠;通道 3 上的 FBG 复用数目很少,光谱不易重叠。为了验证重叠光谱分类的准确性与解调精度,先对具有不同重叠程度的多峰信号进行解调仿真实验。图 6(a)展示了不同重叠情况下的四组 FBG 的反射光谱信号,这四对 FBG 光谱的重叠程度

分为无重叠、部分重叠、部分重叠和完全重叠。3 dB 带宽 $\Delta\lambda_i=0.2$ nm。

在保证四组光谱重叠情况不变的前提下,改变各组 FBG 的中心波长,每组实验计算 10 次,取 10 次计算的平均结果作为最后的解调结果。各峰的平均检测误差如图 6(b)所示,各峰的检测误差皆小于 10 pm。表 1 展示了其重叠光谱分类结果。

以通道 1 为例,FBG 重叠光谱信号中的光谱多为部分重叠光谱与严重重叠光谱,如图 7 所示。为使 PSO、离散粒子群优化(DPSO)、CWT-PSO 算法得到最优解,在种群规模设为 80 时,将迭代次数分别设为 350、270、50,计算了不同检测算法下各 FBG 反射光谱中心波长的检测误差如表 2 所示,且 PSO、DPSO、CWT-PSO 算法在 FBG7 处的均方根误差分别为 21、3.4、1 pm。

由上述数据可知,各算法在处理完全重叠的光谱

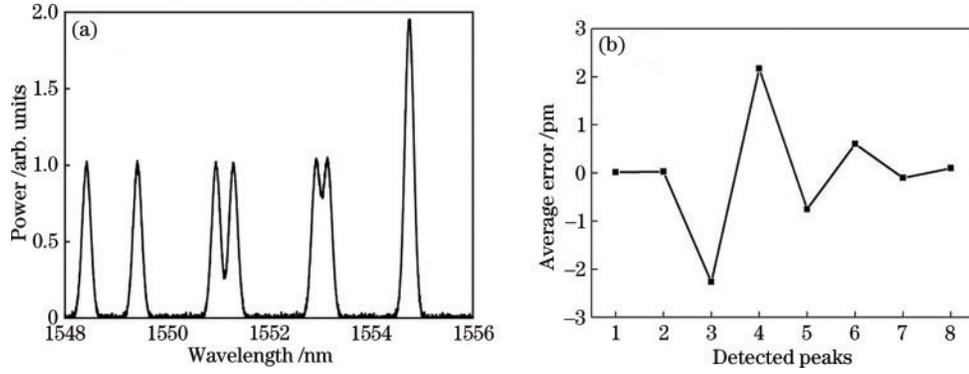


图 6 不同重叠程度下的峰值检测误差。(a)不同重叠程度下的FBG光谱信号;(b)各峰的平均检测误差

Fig. 6 Peak detection error under different degrees of overlap. (a) FBG spectral signals under different degrees of overlap; (b) average detection error of each peak

表 1 不同重叠程度下的FBG重叠光谱分类结果

Table 1 Classification results of FBG verlapping spectra under different degrees of overlap

Peak	λ_{Bi} /nm	L_i /nm	r'_i	Overlap
1	1548.325	0.222	0.999	Non
2	1549.614	0.222	0.997	Non
3	1550.953	0.182	1.008	Partial
4	1551.219	0.182	1.008	Partial
5	1552.941	0.188	1.032	Partial
6	1553.171	0.190	1.032	Partial
7	1555.274	0.264	1.579	Complete
8	1555.392	0.264	1.579	Complete

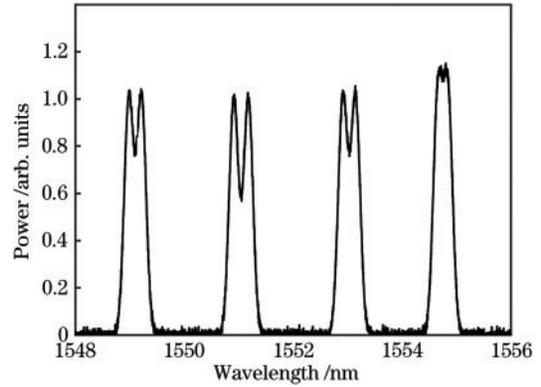


图 7 FBG重叠光谱信号

Fig. 7 FBG overlapping spectrum signals

信号且达到最优解时,CWT脊线寻峰法解调速度最快,但在完全重叠光谱处的解调精度较低;PSO算法的解调时间最长,最容易陷入局部最优;DPSO算法相较于PSO算法不容易陷入局部最优,解调时间略低于PSO算法;麻雀搜索(SSA)算法的解调精度高,但解调时间大于DPSO算法与CWT-PSO算法;而本文所提的CWT-PSO算法具有较高解调精度的同时,不易陷入局部最优,迭代次数小于PSO算法与DPSO算法,解调时间也低于PSO算法与DPSO算法。从整个传感器解调系统来看,通过对重叠光谱的分类与解调,该方法减少了计算量,可以有效提高解调系统的解调

速率与解调精度。

为提高仿真的可靠性,再解调其余光纤阵列上的FBG光谱信号。通道2上信号的解调结果如表3所示。在处理具有部分重叠的光谱信号时,CWT脊线法的检测误差最大;PSO算法与DPSO算法的解调精度较高,但解调时间远大于其他方法;SSA算法有着较高的解调精度,但解调时间大于CWT脊线法与CWT-PSO法;CWT-PSO法在保持较高解调精度的同时,解调时间小于其他智能优化算法。通过分析可知,PSO算法与CWT-PSO法在FBG1处的均方根误差分别为37.2、4.5 pm。由此可以看出,CWT-PSO法的稳定性较高。

表 2 不同算法的解调误差比较

Table 2 Comparison of demodulation errors of different algorithms

	Average error /pm								Average time /s
	FBG1	FBG2	FBG3	FBG4	FBG5	FBG6	FBG7	FBG8	
Mexh-CWT	-8.2	6.2	-6.8	1.8	-9.2	6.4	-13.6	9.2	0.084
PSO	-0.8	-0.2	0.4	0	0.2	0.2	-1.8	-0.8	5.437
DPSO	0	-0.2	-0.4	0	0	-0.8	0.4	0.2	3.851
SSA	-0.07	0.12	0.15	0.04	0.05	0.18	-0.12	-0.02	4.327
CWT-PSO	-0.23	0.01	-3.48	3.10	-0.17	-0.07	0.20	0.20	1.521

表 3 通道 2 上不同算法的 FBG 解调误差比较

Table 3 Comparison of FBG demodulation errors of different algorithms on channel 2

	Average error /pm						Average time /s
	FBG1	FBG2	FBG3	FBG4	FBG5	FBG6	
Mexh-CWT	-4.6	-3.2	-5.2	2.6	-5.4	4.0	0.109
PSO	0.2	0	-0.8	0.4	0	-1.0	3.736
DPSO	0.4	0.2	0.2	0	0	0	3.551
SSA	0.06	0.13	-0.05	0.09	0.12	-0.05	2.448
CWT-PSO	-2.10	2.09	-3.40	3.29	-2.47	2.49	0.958

由上述仿真结果可知,在处理具有不同重叠程度的光谱信号时,该算法可实现重叠光谱准确分类及精准解调,其解调误差在 10 pm 以内。根据信号中多个光谱的重叠程度,可以判别该光谱信号所在的通道及所测参数的重要程度。且相较于统一使用 PSO 算法解调重叠光谱信号,利用 CWT-PSO 法实现 FBG 传感系统中重叠光谱分类及解调可以有效缩短解调时间。

4 结 论

本文提出一种新型的 FBG 传感系统,其主要特点在于根据监测区域的优先级灵活配置传感器数目。在此基础上,利用 CWT-PSO 法实现 FBG 传感系统中重叠光谱的分类及解调。首先利用 CWT 实现重叠光谱的切割与分类,再对分类光谱采用相应的解调方法解调光谱的中心波长。通过重叠光谱分类以降低解调系统的计算量,提高解调速度。仿真结果表明,当多个 FBG 的反射光谱部分或完全重叠时,该解调方法依然能够准确地计算出中心波长,误差不超过 10 pm。相比于单独使用 PSO 算法的解调,节省了时间。该研究工作作为大容量 FBG 传感系统中实现光谱的快速和精准解调提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Zhang W F, Zhang M, Wang X Y, et al. The analysis of FBG central wavelength variation with crack propagation based on a self-adaptive multi-peak detection algorithm [J]. *Sensors*, 2019, 19(5): 1056.
- [2] Ye X W, Su Y H, Xi P S. Statistical analysis of stress signals from bridge monitoring by FBG system[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 491.
- [3] 李亦佳,王正方,王静,等.基于光纤布拉格光栅振动传感器和极限学习机的工字钢梁损伤识别[J].*中国激光*, 2021, 48(16): 1610004.
Li Y J, Wang Z F, Wang J, et al. Damage identification of I-beam based on fiber Bragg grating vibration sensor and extreme learning machine[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(16): 1610004.
- [4] Alwis L S M, Bustamante H, Roth B, et al. Evaluation of the durability and performance of FBG-based sensors for monitoring moisture in an aggressive gaseous waste sewer environment[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3380-3386.
- [5] Wang J Q, Zhao L, Liu T Y, et al. Novel negative pressure wave-based pipeline leak detection system using fiber Bragg grating-based pressure sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3366-3373.
- [6] 王玉宝,兰海军.基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J].*光学学报*, 2010, 30(8): 2196-2201.
Wang Y B, Lan H J. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2196-2201.
- [7] Tian K, Chen G X, Song Q Y, et al. Time- and wavelength-division multiplex distributed sensing interrogation system based on distributed feedback laser array and ultraweak fiber Bragg grating[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(11): 117104.
- [8] Manie Y C, Peng P C, Shiu R K, et al. Enhancement of the multiplexing capacity and measurement accuracy of FBG sensor system using IWDM technique and deep learning algorithm[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(6): 1589-1603.
- [9] 江灏,林朝晖,陈静,等.考虑非对称重叠光谱的 FBG 传感网络带宽资源多目标优化配置[J].*光学学报*, 2021, 41(10): 1006002.
Jiang H, Lin C H, Chen J, et al. Multi-objective optimal configuration of bandwidth resources in FBG sensor network for asymmetric overlapping spectra[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1006002.
- [10] Hu Y, Mo W Q, Dong K F, et al. Using maximum spectrum of continuous wavelet transform for demodulation of an overlapped spectrum in a fiber Bragg grating sensor network[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(17): 4670-4675.
- [11] Ding P, Huang J B, Tang J S. Multi-peak FBG reflection spectrum segmentation based on continuous wavelet transformation[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 50: 250-255.
- [12] 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.
- [13] Wang Y B, Fan X Y, Yao Y, et al. The study of FBG sensor network based on genetic and simulated annealing algorithm[J]. *Journal of Optical Communications*, 2008, 29(4): 209-212.
- [14] 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.

- Qi Y F, Li C L, Jiang P, et al. Spectral shape multiplexing technology of fiber Bragg gratings using simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0906004.
- [15] Gong J M, MacAlpine J M K, Chan C C, et al. A novel wavelength detection technique for fiber Bragg grating sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(5): 678-680.
- [16] 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.
- [17] 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. Zhang M, Zhang W, Zhang P, 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.
- [18] 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.
- [19] 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. 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.
- [20] 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. 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.