

# 基于GA-QPSO混合算法的Brillouin散射谱特征提取方法

张燕君<sup>1,2</sup> 徐金睿<sup>1,2</sup> 付兴虎<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

<sup>2</sup>河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 提出了一种将遗传算法(GA)和量子粒子群(QPSO)算法相结合的新优化算法,该算法通过运用GA中的交叉和变异算子操作来优化QPSO算法,提高QPSO的全局搜索能力,克服其易陷入局部极值的缺点。将其应用到Pseudo-Voigt型布里渊散射谱特征提取,对不同权重比、不同线宽和不同信噪比下的布里渊散射谱进行了参数估计和分析,通过采集不同温度时的布里渊散射谱实验数据,利用GA-QPSO算法对实验数据进行处理。实验结果表明,利用GA-QPSO算法可以提高布里渊散射谱的频移提取精度,当温度为25℃时,频移拟合误差最大为2.18 MHz,且随着温度的升高,平均拟合误差逐渐减小,在80℃时的频移拟合误差最大为0.065 MHz。因此,将该算法用于布里渊散射温度和应变传感系统,在提高空间分辨率、检测精度等方面具有很好的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 分布式光纤传感; 布里渊散射谱; 遗传算法; 量子粒子群算法; 温度

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0205002

## Method of Brillouin Scattering Spectrum Character Extraction Based on Genetic Algorithm and Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization Hybrid Algorithm

Zhang Yanjun<sup>1,2</sup> Xu Jinrui<sup>1,2</sup> Fu Xinghu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

<sup>2</sup>Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** A new optimization algorithm is presented, which is based on the genetic algorithm (GA) and quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO) algorithm. The algorithm uses the crossover and mutation operators of GA to optimize the QPSO algorithm, improves its global search ability and overcomes the disadvantage that QPSO algorithm easily falls into local extremum. It is used to extract the character of the Pseudo-Voigt-shaped Brillouin scattering spectrum. The parameters estimation and simulation analysis of Brillouin scattering spectrum are analyzed under different weight ratios, line widths and signal-to-noise ratios. The experimental data of Brillouin scattering spectrum are collected in different temperatures and processed by GA-QPSO algorithm. The experimental results show that the GA-QPSO algorithm can improve the frequency shift extraction accuracy of Brillouin scattering spectrum. The maximum error of frequency shift fitting is 2.18 MHz under 25 °C and the average fitting error decreases with the increase of temperature, gradually. The frequency shift fitting maximum error is 0.065 MHz under 80 °C. Therefore, the new algorithm can be used for measuring the temperature and strain in Brillouin scattering

收稿日期: 2015-07-15; 收到修改稿日期: 2015-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(61205068)、中国博士后科学基金(2013M541200)、河北省自然科学基金(F2014203125)、燕山大学“新锐工程”人才支持计划项目资助

作者简介: 张燕君(1973—),女,博士,教授,主要从事光传感、光电检测与信号处理等方面的研究。

E-mail: yjzhang@ysu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn

sensing system. It has a very good application prospect in improving spatial resolution and detection precision.

**Key words** fiber optics; distributed optical fiber sensing; Brillouin scattering spectrum; genetic algorithm; quantum-behaved particle swarm optimization algorithm; temperature

**OCIS codes** 060.2370; 290.5830; 200.4560; 290.5820

## 1 引 言

近年来,随着光纤传感技术的迅猛发展,基于布里渊散射的分布式光纤传感器越来越受到重视<sup>[1]</sup>。该类光纤传感器是利用布里渊散射谱频移对温度、应变等外界物理量变化敏感的特性实现传感<sup>[2]</sup>,其中,如何高精度地获取布里渊散射谱频移的相对变化量是研究基于布里渊散射谱的分布式光纤传感技术的关键<sup>[3]</sup>。

目前,提取布里渊散射谱信息的方法主要有:利用莱文伯-马夸特算法调节权值的径向基函数神经网络算法<sup>[4]</sup>、模拟鸟类觅食的粒子群算法<sup>[5]</sup>、基于有限元分析的 Levenberg-Marquardt 算法<sup>[6]</sup>及基于有限元分析的牛顿法<sup>[7]</sup>等,这些方法虽然能完成对布里渊散射谱特征信息的提取,但是还存在着初值依赖性较强、提取信息精度较低等不足。因此,为了进一步提高布里渊散射谱信息提取的精度,本文提出了一种结合遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和量子粒子群(Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization, QPSO)算法的混合优化算法,将其应用到 Pseudo-Voigt 型谱的拟合和布里渊频移的最优化估计问题,并采集了 25 ℃、50 ℃、60 ℃、70 ℃和 80 ℃五组温度下的布里渊散射谱实验数据,运用 GA-QPSO 算法对采集到的实验数据进行了处理。

## 2 布里渊散射谱拟合原理

在理想状态下,传感光纤中的布里渊散射谱呈洛伦兹(Lorentzian)型函数曲线<sup>[8]</sup>。但在实际的传感系统中,在光纤中传输的光波会发生谱线展宽的现象,主要包括自然展宽、多普勒展宽、声子激发不充分导致的展宽、脉冲调制器消光比不足而导致的展宽等<sup>[9]</sup>,从而导致布里渊散射谱线展宽并向高斯(Gaussian)型谱线逼近,使得实际环境中的光纤布里渊散射频谱介于洛伦兹型谱线与高斯型谱线之间<sup>[10]</sup>。因此,将 Lorentzian 型谱和 Gaussian 型谱的线性权重组合,得到的 Pseudo-Voigt 型谱作为本文布里渊散射谱拟合的基函数<sup>[11]</sup>,即

$$f_B(x) = k \frac{(\Delta v_{B1}/2)^2}{(x - v_B)^2 + (\Delta v_{B1}/2)^2} + (1 - k) \exp \left[ -2.773 \left( \frac{x - v_B}{\Delta v_{B2}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

式中  $k$  是线性权重系数,  $v_B$  是中心频移,  $\Delta v_{B1}$  是洛伦兹谱线宽,  $\Delta v_{B2}$  是高斯谱线宽。Lorentzian 型谱、Gaussian 型谱、实际散射谱即 Pseudo-Voigt 型布里渊散射谱如图 1 所示。图中横坐标为布里渊散射谱频移量,纵坐标为归一化的布里渊散射谱增益。

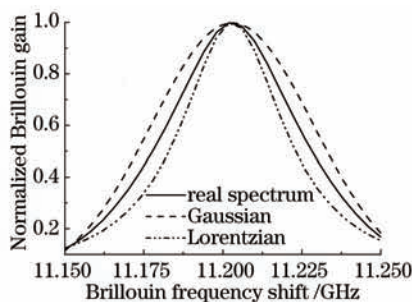


图 1 布里渊散射谱示意图

Fig.1 Brillouin scattering spectrum diagram

实验采集到的布里渊散射谱数据点集,用  $(x_i, y_i)$  表示。对布里渊散射谱实验数据进行拟合,得到逼近数据点分布的布里渊散射谱基函数  $y = f_B(x)$ 。将每一个离散数据点对应横坐标的值代入基函数,得到一组代表布里渊散射谱光功率的幅值。将每个离散数据点纵坐标的值与基函数对应计算出的值作差,只有当这些差的平方和即  $r^2 = \sum_{i=0}^{m-1} [y_i - f_B(x_i)]^2$  达到最小时,对布里渊散射谱实验数据的曲线拟合状态才是最优的。

### 3 混合优化算法基本原理

#### 3.1 遗传算法与量子粒子群算法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种结合遗传学原理和自然选择法则的迭代寻优算法<sup>[12]</sup>。GA算法具有一定的自适应性,通过利用自身的交叉、变异算子对种群中的染色体进行操作,不断迭代更新,得到系统所需的最优解。

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种具有全局搜索能力的进化算法<sup>[13]</sup>。PSO算法中,为了得到系统所需的最优解,种群中每个粒子都需要按照(2)~(3)式来更新速度和位置:

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij} + c_1 r_1 [P_{\text{best}i}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2 [G_{\text{best}i}(t) - x_{ij}(t)], \quad (2)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad (3)$$

式中  $c_1$ 、 $c_2$  为加速度常数(学习速率),  $r_1$ 、 $r_2$  是在 0、1 之间随机产生的、服从均匀分布的实数,  $P_{\text{best}i}$  是种群中第  $i$  个粒子的个体最优解,  $G_{\text{best}i}$  是整个种群的群体最优解。  $v_{ij}$ 、 $x_{ij}$  分别是种群中第  $i$  个粒子第  $j$  个参数当前的速度和位置。

量子粒子群算法是在标准 PSO 算法的基础之上,将量子理论引入其中而建立起来的一种优化算法<sup>[14]</sup>。具有量子行为的粒子,在种群空间范围下拥有更广泛的搜索能力,一定程度上克服了标准 PSO 算法易陷入局部最优解的缺陷。

在 QPSO 中粒子群按照(4)~(6)式进行更新:

$$m_{\text{best}}(t+1) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_i(t) = \left[ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{i1}(t), \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{i2}(t), \dots, \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{iD}(t) \right], \quad (4)$$

$$P_{ig}(t+1) = f_{ij}(t+1) \times P_{ij}(t) + [1 - f_{ij}(t+1)] \times P_{gj}(t), \quad (5)$$

$$X_{ij}(t+1) = P_{ig}(t+1) + \text{rand}(t+1) \times \beta(t+1) \times |m_{\text{best}i}(t+1) - X_{ij}(t)| \times \ln \left[ \frac{1}{u_{ij}(t+1)} \right], \quad (6)$$

式中  $M$  是种群粒子数,  $D$  是粒子维度,  $P_i(t)$  是种群第  $t$  次迭代时、第  $i$  个粒子个体最优位置,  $P_g(t)$  是种群第  $t$  次迭代时、种群的全局最优位置。  $m_{\text{best}}(t+1)$  是种群第  $t$  次迭代时、全部粒子个体最优位置  $P_{\text{best}}(t)$  的中间位置,  $P_{ig}(t+1)$  为  $P_i(t)$  和  $P_g(t)$  之间的随机点。  $f_{ij}(t+1) = \text{rand}(0, 1)$ ,  $u_{ij}(t+1) = \text{rand}(0, 1)$ , 函数  $\text{rand}(0, 1)$  的功能是随机产生一个介于 0、1 之间的、服从均匀分布的实数,且  $\text{rand}(t+1)$  的值要以一定的概率从 +1 和 -1 两个数中选取。(6)式中的  $\beta(t)$  是 QPSO 重要参量,是收缩扩张系数(创造力系数)用以控制 QPSO 算法的收敛速度<sup>[15]</sup>。

#### 3.2 混合优化算法

随着 QPSO 算法不断的更新迭代,种群粒子的多样性必然减少,使 QPSO 算法同样无法避免过早陷入局部最优解,从而使算法对当前系统中待估参量的求解出现较大的误差<sup>[16]</sup>。基于此,本文提出 GA-QPSO 的混合优化算法,不但可以增强 QPSO 全局搜索能力,克服其易陷入局部极值的缺点,还能提高系统参数求解精度。

GA-QPSO 混合算法具体步骤:

1) 设定 QPSO 算法中的种群粒子个数和取值范围并赋初值,根据 Pseudo-Voigt 型散射谱基函数确定寻优参数的维数和变化范围。

2) 将 QPSO 算法种群中的粒子视为 GA 算法中的染色体,计算每个染色体对应的适应度值。

3) 以适应度值为评价指标,收集最佳染色体。不同遗传年代下,对同一染色体的适应度值进行比较,较好的适应度值作为下一代该染色体当前适应度值,较好染色体适应度值对应粒子的值即为  $P_{\text{best}}$ ;相同遗传年代,对全部染色体适应度值进行排序,把最佳染色体适应度值对应粒子的值作为此时的  $G_{\text{best}}$ 。

4) 利用 QPSO 算法对种群全局进行初步搜索,通过(4)~(6)式对种群中粒子的位置进行更新,但此时算法的全局搜索能力不足,所以粒子更新也不充分。

5) 利用 GA 算法对步骤 4) 中更新不充分的粒子进行交叉算子操作。该操作使粒子之间能够进行信息交互,使粒子具有得到更广泛空间下位置更新的机会。

6) 对完成交叉算子操作后的染色体再进行变异算子操作。该操作提高了 GA 算法局部随机搜索能力,

加速 GA 算法对全局最优解的收敛。

7) 对当前更新后的粒子群中的每个粒子,再次计算各自对应的适应度值,并根据适应度值更新  $P_{best}$  和  $G_{best}$ 。

8) 以达到一定迭代次数或最优解误差满足系统需要为终止条件,满足该条件,输出最优解,算法终止;不满足该条件,重复步骤 4)~7)。

#### 4 GA-QPSO 混合优化算法仿真分析

为了说明混合算法对不同线性权重比和不同线宽的广泛适用性,在布里渊散射谱中心频移理论范围内,假设当前布里渊散射谱中心频率为 11.203 GHz。Lorentz 谱和 Gauss 谱的线性权重比  $Q$  分别设定为 9:1、8:2、7:3、6:4,线宽  $\Delta v$  分别设定为 40、60、80、100 MHz。为了模拟实际传感环境,在理想布里渊散射谱离散数据点上加入 30 dB 的高斯白噪声,再对其进行处理。拟合结果如图 2 所示。

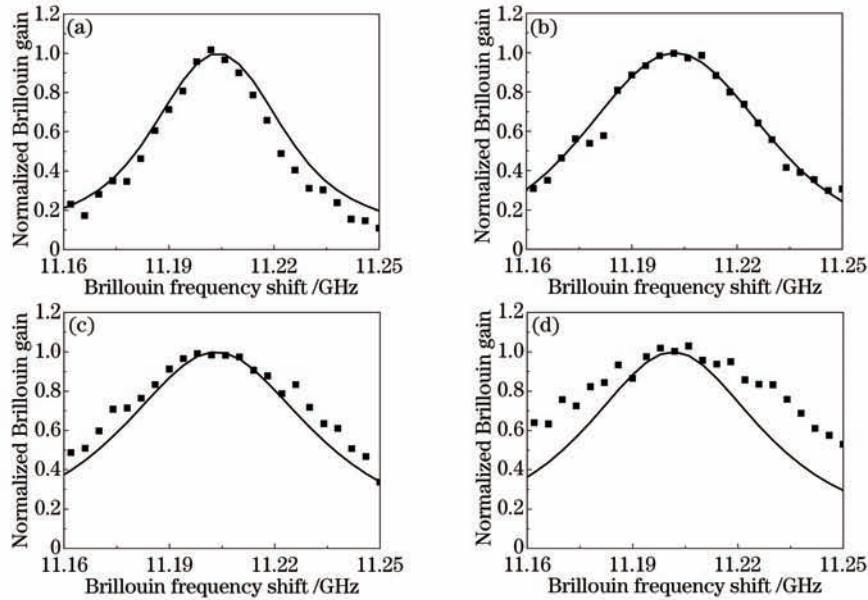


图 2 不同情况下的 Brillouin 散射谱拟合曲线。(a)  $Q=9:1, \Delta v_{b1}=\Delta v_{b2}=40$  MHz; (b)  $Q=8:2, \Delta v_{b1}=\Delta v_{b2}=60$  MHz; (c)  $Q=7:3, \Delta v_{b1}=\Delta v_{b2}=80$  MHz; (d)  $Q=6:4, \Delta v_{b1}=\Delta v_{b2}=100$  MHz

Fig.2 Fitting results of Brillouin scattering spectra of different conditions. (a)  $Q=9:1, \Delta v_{b1}=\Delta v_{b2}=40$  MHz; (b)  $Q=8:2, \Delta v_{b1}=\Delta v_{b2}=60$  MHz; (c)  $Q=7:3, \Delta v_{b1}=\Delta v_{b2}=80$  MHz; (d)  $Q=6:4, \Delta v_{b1}=\Delta v_{b2}=100$  MHz

设定基函数线性权重比为 9:1,信噪比( $R_{SN}$ )分别为 20 dB、30 dB 和 40 dB,对不同线宽的布里渊散射谱数据点进行拟合,其结果如表 1 所示。结果表明,利用 GA-QPSO 算法对不同信噪比和线宽的数据拟合,都可以得到高精度的布里渊频移。

表 1 不同参数下得到的拟合结果

Table 1 Fitting results of different parameters

$R_{SN}$ /dB	Linewidth /MHz	Brillouin frequency shift error /MHz	Temperature error /K
20	40	0.7432	0.664
	60	0.5128	0.456
	80	0.8488	0.758
30	40	0.7903	0.706
	60	0.7641	0.682
	80	0.3117	0.278
40	40	0.2751	0.246
	60	0.6971	0.622
	80	0.2581	0.230

当线性权重比为 9:1、谱线宽为 40 MHz 和信噪比为 30 dB 时,得到 PSO 算法、QPSO 算法、GAPSO 算法、



LM-PSO算法和GA-QPSO算法的拟合曲线如图3所示,五种算法的频移拟合误差和拟合度如表2所示。

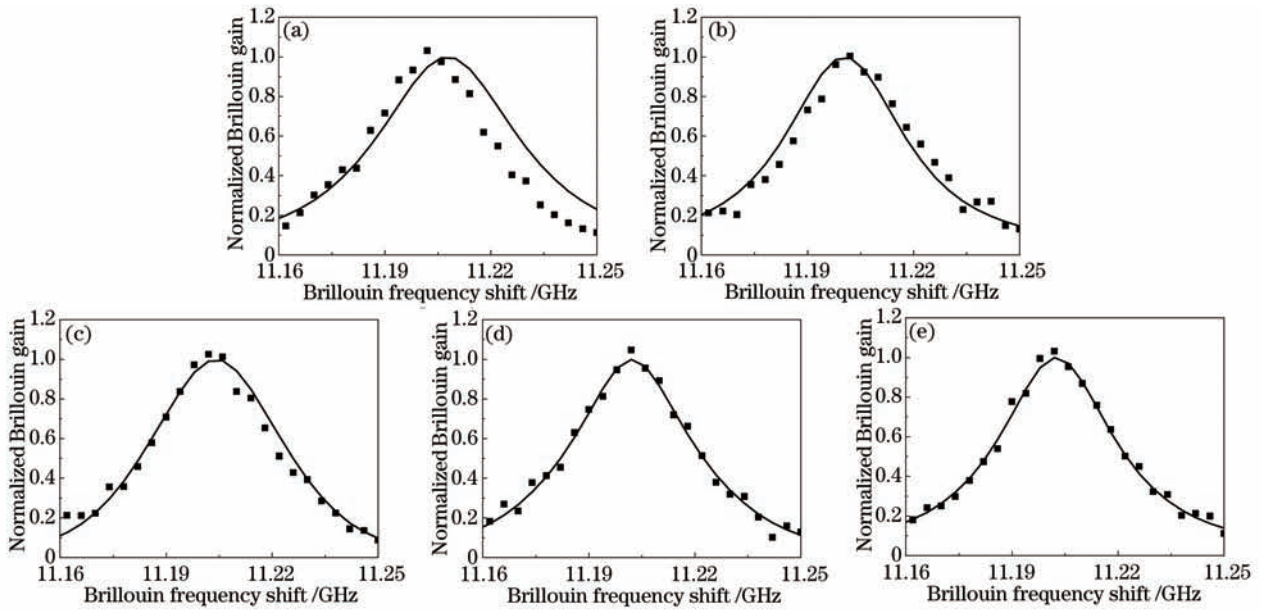


图3 五种算法拟合曲线的对比。(a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d)LM-PSO; (e) GA-QPSO

Fig.3 Comparison of fitting results between five kinds of algorithms. (a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d) LM-PSO; (e) GA-QPSO

表2 布里渊频移误差和拟合度比较

Table 2 Comparison of Brillouin frequency shift errors and fitting degrees

Algorithm	Brillouin frequency shift error /MHz	Fitting degree $R^2$
PSO	4.85	0.8393
QPSO	2.55	0.9521
GAPSO	1.25	0.9719
LM-PSO	0.79	0.9741
GA-QPSO	0.42	0.9913

由图3和表2可知,在相同仿真参数条件下,GA-QPSO混合算法较其他四种算法得到了最小的布里渊散射谱中心频移误差和最好的拟合度,分别为0.42 MHz和0.9913。下面通过采集不同温度下的实验数据进行分析,以验证理论仿真结果。

## 5 实验结果与分析

搭建的分布式光纤布里渊散射谱测量系统如图4所示。图4中,激光器(DFB-LD)产生的光,通过光纤耦合器被分成探测光和参考光。探测光经过声光调制器(AOM)调制成脉冲光波,脉冲光再由掺铒光纤放大器(EDFA)放大后经偏振态控制器(PC)和环形器进入传感光纤中;参考光通过微波源和直流稳压电源(DC)控制

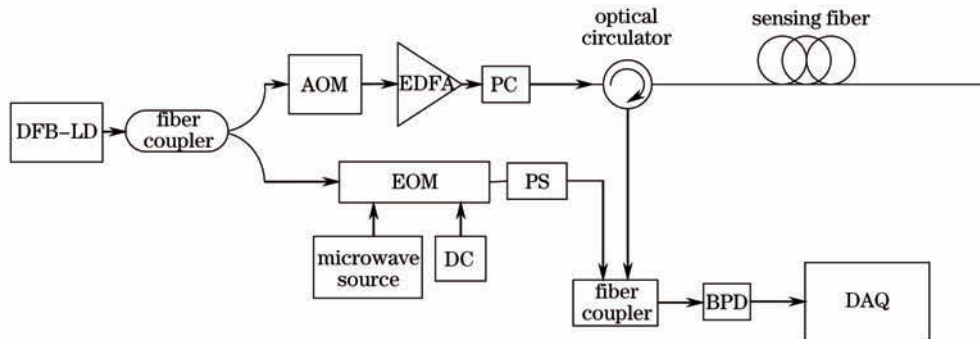


图4 分布式光纤传感布里渊散射谱测量系统

Fig.4 Distributed optical sensing system based on Brillouin scattering

的电光调制器(EOM)进行调制,调制后的光经过扰偏器(PS)与从环形器返回来的布里渊后向散射光进行相干。双平衡探测器(BPD)将相干之后的光信号转化为电信号,最后通过数字采集系统(DAQ)得到布里渊散射谱的实验数据。

实验中所用的光纤总长度为 30 km。将其尾端长 1 km 的传感光纤置于恒温箱中加热,其余光纤处于室温 20 °C 环境中。不同温度下,系统测量的布里渊散射谱经过光电转换后,都以电子扫频的方式进行数据采集。本文以 25 °C、50 °C、60 °C、70 °C 和 80 °C 五组温度的实验数据为样本,分别运用 GA-QPSO 算法和其他算法进行对比,拟合结果如图 5~9 所示。

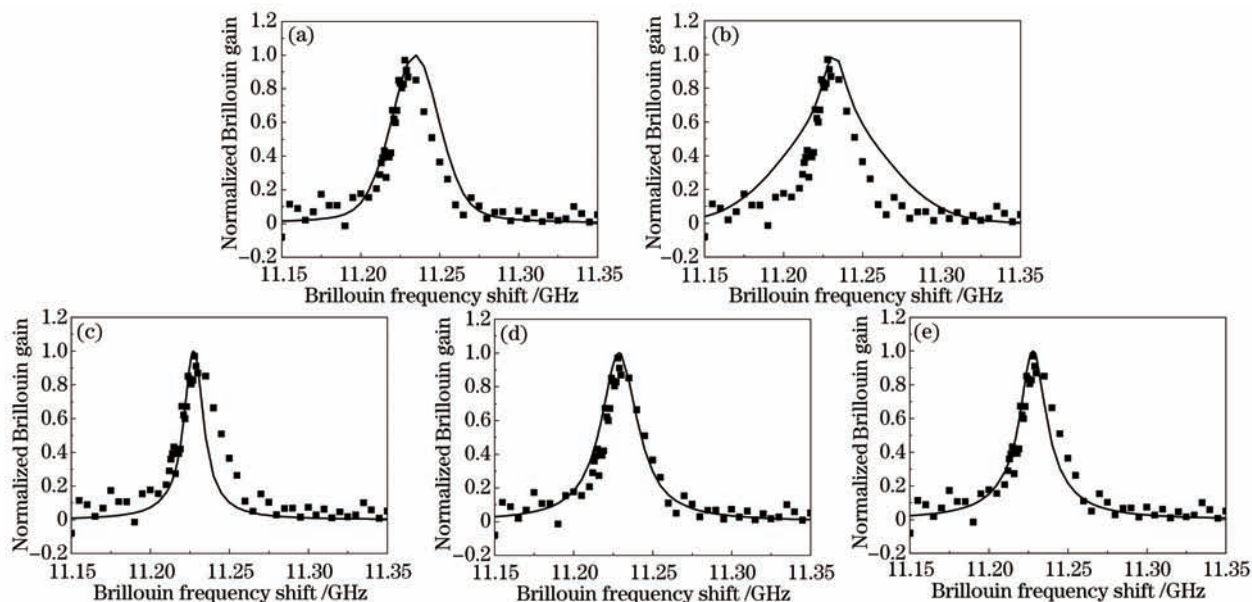


图 5 25 °C 下五种算法拟合曲线的对比。(a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d) LM-PSO; (e) GA-QPSO

Fig.5 Comparison of fitting results between five kinds of algorithms under 25 °C. (a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d) LM-PSO; (e) GA-QPSO

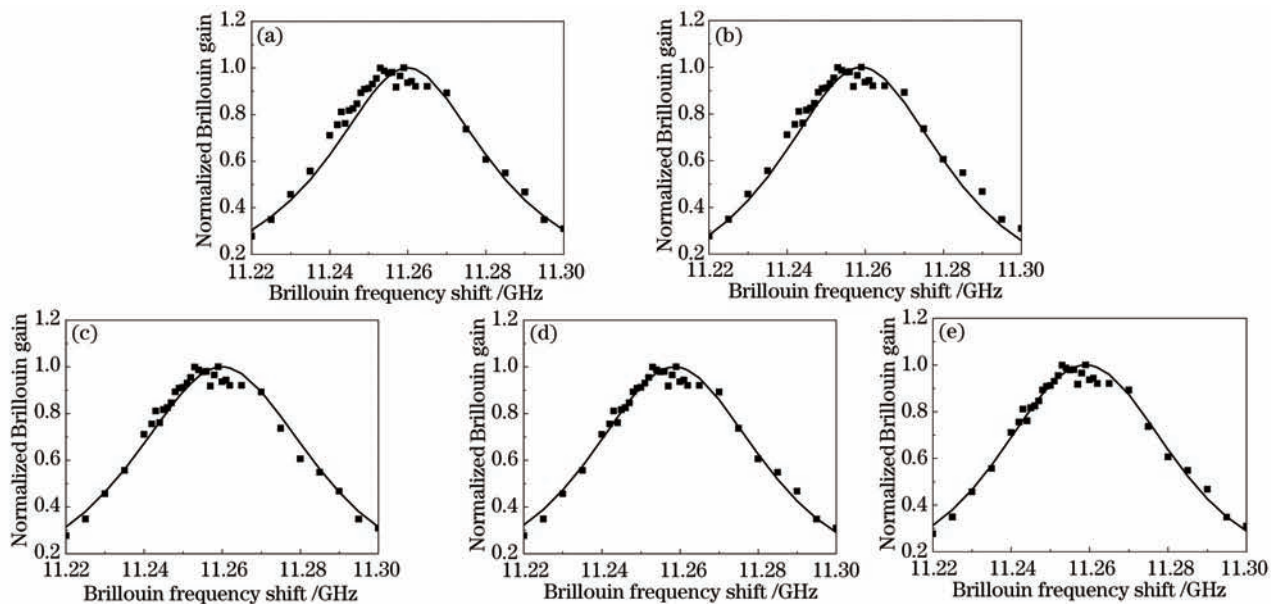


图 6 50 °C 下五种算法拟合曲线的对比。(a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d) LM-PSO; (e) GA-QPSO

Fig.6 Comparison of fitting results between five kinds of algorithms under 50 °C. (a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d) LM-PSO; (e) GA-QPSO

通过 GA-QPSO 算法对以上五种温度下布里渊散射谱实验数据进行拟合,五种温度下的拟合结果比较如表 3 所示。

表3 25 ℃、50 ℃、60 ℃、70 ℃、80 ℃下布里渊频移误差和拟合度比较

Table 3 Comparison of Brillouin frequency shift errors and fitting degrees under 25 ℃、50 ℃、60 ℃、70 ℃、80 ℃

Algorithm	Brillouin frequency shift error /MHz					Fitting degree $R^2$				
	25 ℃	50 ℃	60 ℃	70 ℃	80 ℃	25 ℃	50 ℃	60 ℃	70 ℃	80 ℃
PSO	4.5	8.0	11.0	4.3	2.1	0.888	0.949	0.710	0.972	0.954
QPSO	2.6	7.0	3.9	2.2	1.9	0.697	0.964	0.866	0.985	0.966
GAPSO	2.5	3.0	3.8	2.9	1.8	0.896	0.971	0.897	0.977	0.976
LM-PSO	3.4	6.6	4.1	4.9	2.0	0.889	0.966	0.840	0.984	0.970
GA-QPSO	2.087	1.065	0.920	0.203	0.036	0.907	0.980	0.961	0.993	0.973

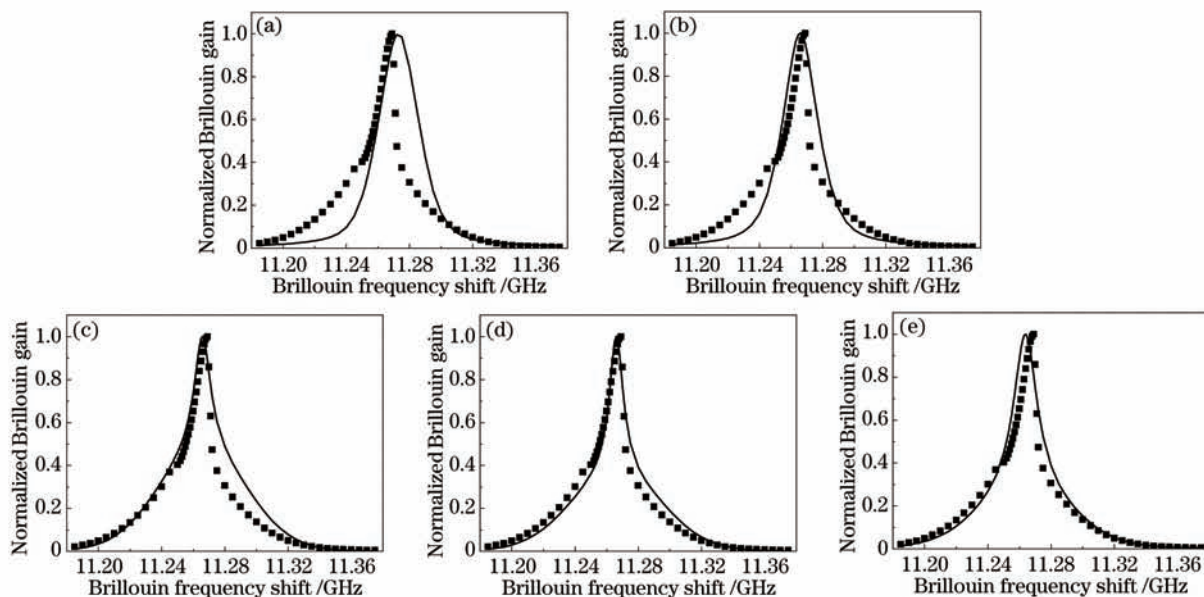


图7 60 ℃下五种算法拟合曲线的对比。(a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d) LM-PSO; (e) GA-QPSO

Fig.7 Comparison of fitting results between five kinds of algorithms under 60 ℃. (a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d) LM-PSO; (e) GA-QPSO

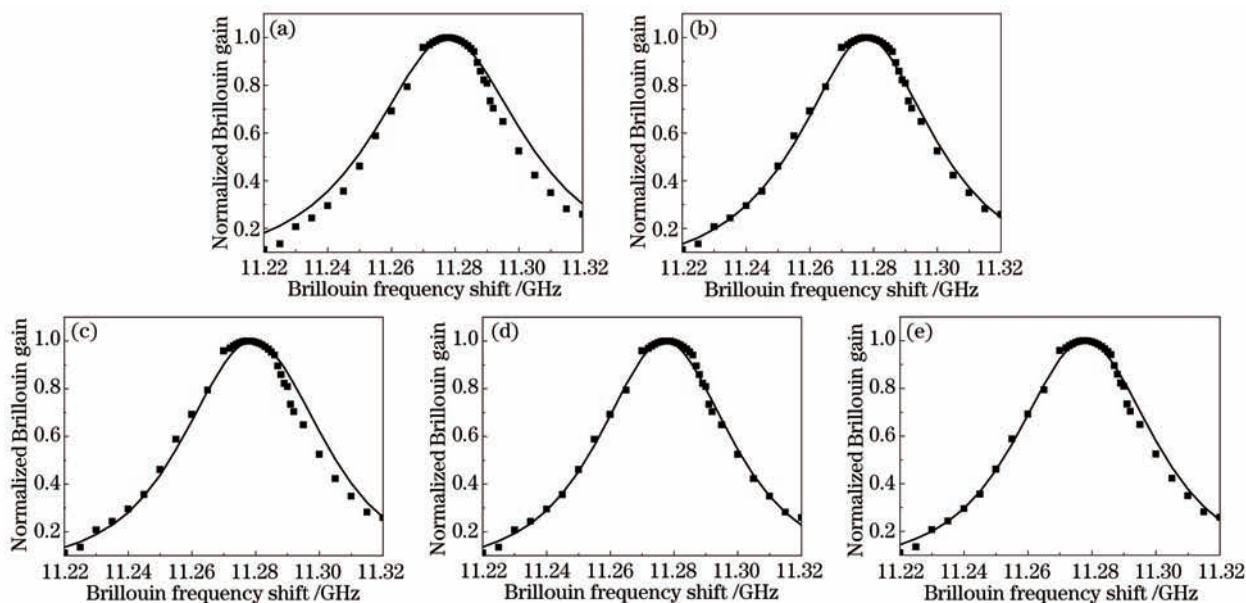


图8 70 ℃下五种算法拟合曲线的对比。(a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d) LM-PSO; (e) GA-QPSO

Fig.8 Comparison of fitting results between five kinds of algorithms under 70 ℃. (a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d) LM-PSO; (e) GA-QPSO

由图5~9和表3可知,GA-QPSO算法较其他四种算法而言,在25 ℃、50 ℃、60 ℃、70 ℃和80 ℃五组温度实验数据的拟合中,均能得到更小的布里渊散射谱频移误差,其原因在于,单纯运用PSO算法或QPSO算法



虽然可以完成布里渊散射谱的拟合,但由于种群中粒子更新不充分,全局搜索能力下降,使两种算法易陷入局部最优解而过早结束,致使其拟合结果不佳。将GA算法融入其中后,利用GA算法自适应特性来选取交叉、变异两种算子进行操作,提升了种群粒子的全局搜索能力,加速对全局最优解的收敛,跳出局部最优解,使GA-QPSO算法在五种算法中得到了最小的中心频移误差。

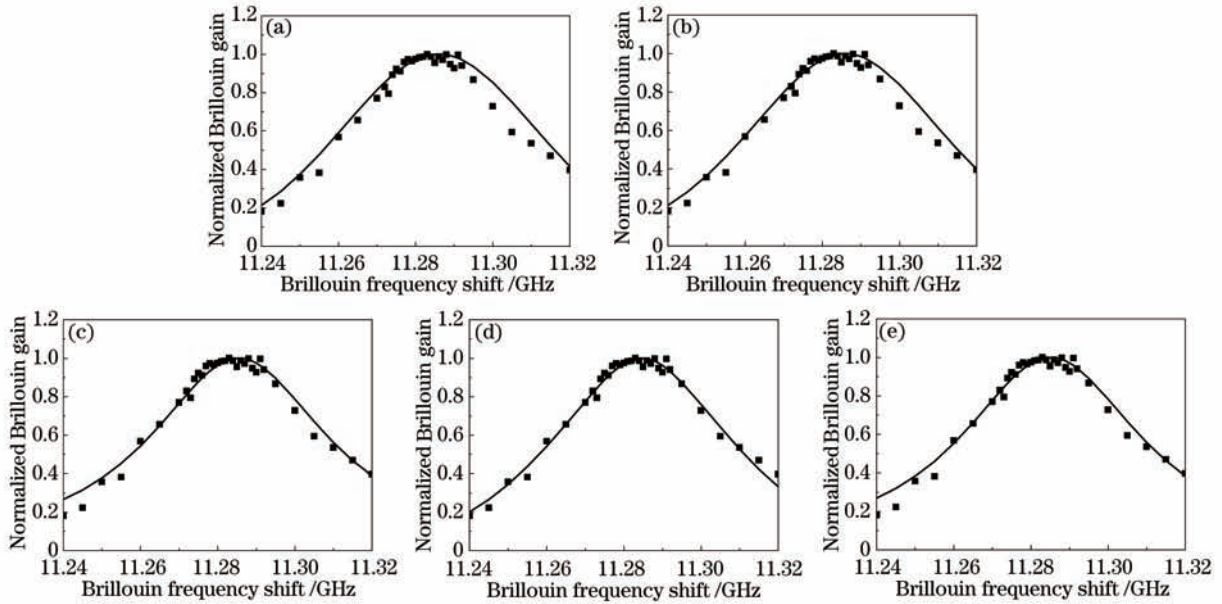


图9 80 °C下五种算法拟合曲线的对比。(a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d) LM-PSO; (e) GA-QPSO

Fig.9 Comparison of fitting results between five kinds of algorithms under 80 °C. (a) PSO; (b) QPSO; (c) GAPSO; (d) LM-PSO; (e) GA-QPSO

为了更好地反映GA-QPSO算法的普适性,对25 °C、50 °C、60 °C、70 °C和80 °C五组温度实验数据,每组分别进行10次拟合。利用10次拟合误差的平均值,来反映混合算法对该温度下布里渊散射谱的拟合能力。拟合结果及误差如表4所示。

表4 25 °C、50 °C、60 °C、70 °C和80 °C下布里渊频移误差比较

Table 4 Comparison of Brillouin frequency shift errors under 25 °C、50 °C、60 °C、70 °C and 80 °C

Temperature	25 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C
Brillouin frequency shift error /MHz	0.83	0.96	0.98	0.52	0.005
	1.30	1.83	0.88	0.82	0.052
	1.60	0.58	0.95	0.47	0.002
	1.40	0.34	0.78	0.20	0.002
	0.57	1.46	0.99	0.29	0.008
	0.77	0.87	0.97	0.26	0.065
	1.16	0.27	0.58	0.54	0.056
	2.18	0.42	0.30	0.56	0.060
	0.15	1.76	0.56	0.04	0.047
	1.33	0.30	0.78	0.44	0.058
Average error /MHz	1.13	0.88	0.78	0.41	0.036

在GA-QPSO算法的计算过程中,由于量子粒子群算法在目标参数范围下对种群粒子的初始化是随机的,而且种群粒子在循环迭代过程中的交叉、变异操作也是在设定的交叉概率、变异概率下随机进行的,又因为混合算法的终止条件是满足一定迭代次数或者满足一定误差需求,因此导致应用GA-QPSO算法对不同温度实验数据拟合时,终止时刻得到的布里渊中心频移误差的值是不同的。对表4分析可知,虽然对同一温度下的布里渊散射谱实验数据的拟合结果不同,但拟合误差都在某一范围内,且随着温度的升高,平均误差逐渐减小。由此证明了GA-QPSO算法具有普遍适用性。



## 6 结 论

应用所提出的新的 GA-QPSO 算法提取 Pseudo-Voigt 型布里渊散射谱特征,并进行了详细分析。通过对不同权重比、不同线宽和不同信噪比下的布里渊散射谱的参数估计和分析,利用 GA-QPSO 算法对不同温度时的布里渊散射谱实验数据进行处理,结果表明,GA-QPSO 算法适用于布里渊散射谱特征的提取,25 °C 时频移拟合误差最大为 2.18 MHz,且随着温度的升高,平均拟合误差逐渐减小;80 °C 时频移拟合误差最大为 0.065 MHz。因此,基于 Pseudo-Voigt 型谱的 GA-QPSO 算法具有拟合精度较高、参数估计准确等特点,可用于光纤布里渊传感系统中温度、应变等物理量信息的精确提取。

### 参 考 文 献

- 1 Liu Kun, Feng Bowen, Liu Tiegeng, *et al.*. Continuous distributed fiber strain location sensing based on optical frequency domain reflectometry[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0505006.  
刘 琨,冯博文,刘铁根,等.基于光频域反射技术的光纤连续分布式定位应变传感系统[J].中国激光,2015,42(5):0505006.
- 2 Wang Rugang, Zhou Liuying, Zhang Xuping. Fabrication and performance research of high-stability Brillouin ring laser[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(10): 1884-1888.  
王如刚,周六英,张旭苹.高稳定性布里渊环形激光器的研制与性能研究[J].光电子·激光,2013,24(10):1884-1888.
- 3 Li Yongqian, Li Xiaojuan, An Qi. New method to improve the performance of Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106003.  
李永倩,李晓娟,安琪.提高布里渊光时域反射系统传感性能的方法[J].光学学报,2015,35(1):0106003.
- 4 Liu Yin, Fu Guangwei, Zhang Yanjun, *et al.*. A novel method for Brillouin scattering spectrum of distributed sensing systems based on radial basis function neural networks to extract features[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0206002.  
刘 银,付广伟,张燕君,等.基于径向基函数神经网络的传感布里渊散射谱特征提取[J].光学学报,2012,32(2):0206002.
- 5 Zhang Yanjun, Zhang Shuguo, Fu Guangwei, *et al.*. Research on and application of hybrid optimization algorithm in Brillouin scattering spectrum parameter extraction problem[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(4): 915-919.  
张燕君,张书国,付广伟,等.布里渊散射谱参数提取问题的混合优化算法研究与应用[J].光谱学与光谱分析,2012,32(4):915-919.
- 6 Zhang Y J, Li D, Fu X H, *et al.*. An improved Levenberg-Marquardt algorithm for extracting the features of Brillouin scattering spectrum [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(1): 015204.
- 7 Zhang Y J, Yu C J, Fu X H, *et al.*. An improved Newton algorithm based on finite element analysis for extracting the Brillouin scattering spectrum features[J]. Measurement, 2014, 51: 310-314.
- 8 Nikles M, Thevenaz L, Robert P A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(10): 1842-1851.
- 9 Liu Yin, Zhang Yanjun, Li Da, *et al.*. Hybrid algorithm particle swarm optimization and Levenberg-Marquardt for Brillouin scattering spectrum of distributed sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0415001.  
刘 银,张燕君,李 达,等.粒子群优化和拉凡格氏混合优化算法提取传感布里渊散射谱特征的方法[J].中国激光,2012,39(4):0415001.
- 10 Zhang Zhihui, Zhang Peng, Han Shunli. Strain characteristic extraction of Brillouin spectrum based on general regression neural network [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(s1): s105008.  
张志辉,张 鹏,韩顺利.基于广义回归神经网络提取布里渊谱的应变特征[J].中国激光,2013,40(s1):s105008.
- 11 Ida T, Ando M, Toraya H. Extended Pseudo-Voigt function for approximating the Voigt profile[J]. Journal of Applied Crystallography, 2000, 33(6): 1311-1316.
- 12 Tang Yunhai, Wu Quanying, Chen Xiaoyi, *et al.*. Optimization design of the Meridian line of progressive addition lenses based on genetic algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0922005.  
唐运海,吴泉英,陈晓翌,等.基于遗传算法的渐进多焦点镜片子午线优化设计[J].光学学报,2014,34(9):0922005.
- 13 Hong Lei. The study of particle swarm optimization and artificial fish swarm algorithm[J]. Software, 2014, 35(8): 83-85.  
洪 蕾.粒子群及人工鱼群算法优化研究[J].软件,2014,35(8):83-85.
- 14 Xi Maolong, Sheng Xinyi, Sun Jun. Quantum-behaved particle swarm optimization algorithm with crossover operator to multi-dimension problems[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(3): 680-684.

- 奚茂龙, 盛歆漪, 孙 俊. 基于多维问题的交叉算子量子粒子群优化算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(3): 680-684.
- 15 Wang Xiaogen, Long Haixia, Sun Jun. Quantum-behaved particle swarm optimization based on Gaussian disturbance[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(6): 2093-2096.
- 王小根, 龙海侠, 孙 俊. 基于高斯扰动的量子粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(6): 2093-2096.
- 16 Kong Qingqin, Sun Jun, Xu Wenbo. Improved algorithm based on quantum-behaved particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(28): 58-60.
- 孔庆琴, 孙 俊, 须文波. 基于QPSO的改进算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(28): 58-60.

栏目编辑: 王晓琰