

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

刘 银¹ 张燕君^{1,2} 李 达¹ 张书国¹ 付广伟^{1,2} 付兴虎^{1,2} 毕卫红^{1,2}

(¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004
²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 在基于布里渊散射的分布式光纤传感系统中,沿途光电检测信号信噪比(SNR)过低为被测量的信息反演带来困难。针对高精度解调传感布里渊散射谱的布里渊频偏量的需求,提出了一种利用粒子群优化(PSO)和拉凡格氏(L-M)混合优化算法对传感散射谱进行特征提取的方法。利用 PSO 算法粗调得到一组全局最优解,再以全局最优解作为 L-M 算法的初值,最终将 L-M 算法的运算结果作为结果输出。它克服了 PSO 算法过早收敛于局部极值和 L-M 算法依赖初值的问题,保证了求解的速度和精度。数值分析表明,新算法适合对不同权重比、不同线宽和低 SNR、大测量范围情况下的散射谱进行参数估计,并且在 SNR 为 10 dB 的情况下得到的绝对误差仅为 2.18838 MHz,优于其他两种算法。实验研究表明新算法适用于多种脉宽状况下的布里渊散射谱的特征提取,并可有效提高预测精度。

关键词 光谱学;布里渊散射谱;粒子群优化算法;拉凡格氏算法;分布式光纤传感

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0415001

Hybrid Algorithm Particle Swarm Optimization and Levenberg-Marquardt for Brillouin Scattering Spectrum of Distributed Sensing Systems

Liu Yin¹ Zhang Yanjun^{1,2} Li Da¹ Zhang Shuguo¹ Fu Guangwei^{1,2}
Fu Xinghu^{1,2} Bi Weihong^{1,2}

(¹ College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China
² Hebei Key Laboratory Especial Optical Fiber and Fiber Sensor, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract Because the signal noise ratio (SNR) of the optoelectronic information in the Brillouin scattering spectrum of distributed sensing systems is too low, the measured inversion becomes very difficult. In order to extract features for Brillouin scattering spectrum of distributed sensing systems in high accuracy, a novel hybrid algorithm based on Levenberg-Marquardt (L-M) and particle swarm optimization (PSO) is proposed. PSO is applied to get a volume of gross unites which served as the initial value of L-M, then output the result of L-M as the final result. This algorithm overcomes the premature local extremum of PSO and excessive dependence for initial value of L-M. It can ensure the efficiency and precision of the value. Numerical results show that the algorithm can be used in different weight ratios, different line widths, low SNR and scattering spectrum parameter estimation in large scope. The error of the hybrid algorithm is 2.18838 MHz with SNR of 10 dB, which is better than the other two. The experimental results indicate that the new algorithm can extract features for Brillouin spectrum with different pulse widths. It can increase the accuracy of Brillouin scattering spectrum.

Key words spectroscopy; Brillouin scattering spectrum; particle swarm optimization; Levenberg-Marquardt

收稿日期: 2011-10-25; 收到修改稿日期: 2011-12-16

基金项目: 河北省科学技术研究与发展计划(10213509D)资助课题。

作者简介: 刘 银(1986—),男,硕士研究生,主要从事分布式光纤传感方面的研究。E-mail: sagly8695@163.com

导师简介: 毕卫红(1960—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、光电检测及近红外等方面的研究。

E-mail: whbi@ysu.edu.cn(通信联系人)

method; distributed fiber sensors

OCIS codes 300.6420; 190.4370; 060.2310; 280.4788

1 引 言

连续分布式光纤传感技术^[1,2]是近十多年来迅速发展起来的一种新型测量技术,它克服了点式光纤传感技术和准分布式光纤传感技术在实际应用中的局限性。因其利用光纤中的散射效应来实现被测信息的传感,除具有一般光纤传感器的优点外,还可以在沿光纤路径上同时得到被测量场在时间和空间上的连续分布信息^[3]。在航空航天、冶金、煤矿、电力传输、石油测井、水利水电和海洋环境实时在线监测等领域具有广阔的应用前景^[4]。其中基于布里渊散射的分布式光纤传感技术利用应力和温度可以改变散射光的光功率和相对于入射光的频移这个特性,可以实现温度和应变的同时检测。虽然对基于布里渊散射的传感技术^[5,6]研究起步较晚,但是由于其具有可测量多个物理参量、空间分辨率高、传感距离长、测量精度高等优点,近年来备受关注。不论是基于布里渊光时域反射(BOTDR)技术还是布里渊光时域分析(BOTDA)技术的分布式光纤传感器中,其关键是获得布里渊频移的相对变化量。

2010年,宋牟平等^[7]在基于布里渊BOTDA结构的分布式光纤传感系统中,采用正交偏振控制技术,使传感距离达到50 km,空间分辨率10 m,温度分辨率2 K。饶云江课题组^[8]实现了传感距离75 km,温度精度±0.6 K。Bolognini等^[9]在25 km光纤上实现了0.27 K的温度分辨率和30 με的应变分辨率。Cui等^[10]获得了3 m的空间分辨率和1 K的温度精度。不论是基于布里渊BOTDR技术还是布里渊BOTDA技术的分布式光纤传感器,其关键是获得布里渊频移的相对变化量。

在布里渊散射谱拟合的研究中已提出了多种布里渊散射谱拟合方案,如拉凡格氏(L-M)非线性最小二乘法^[11]、五次多项式拟合法^[12]等。本文研究了应用于拟合布里渊散射谱的粒子群优化(PSO)算法和L-M算法的基本原理,讨论了基于PSO和L-M混合优化算法在非线性回归分析中的应用。该算法克服了PSO算法过早收敛于局部极值和L-M算法依赖初值的问题,保证了求解的速度和精度。数值分析和实验证明了该混合优化算法的有效性和可行性,该方法适用于拟合任意脉宽的光脉冲产生的布里渊散射谱,有助于提高测量精确度,对高精度分布式传感系统的研制有一定的指导作用。

2 原 理

2.1 光纤中布里渊谱传输特性和温度与应变的测量

由于光纤中光的传输特性致使布里渊散射谱以布里渊频移 ν_B 为中心,增益谱半峰全宽 $\Delta\nu_B \approx \frac{1}{\pi\Gamma_B}$, Γ_B 为声子寿命,它通常具有洛伦兹型函数曲线^[13]

$$g_B(\nu) = g_0 \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2}. \quad (1)$$

但由于多方面原因如:光在光纤中传输会发生自然展宽、多普勒展宽等现象^[14];注入传感光纤的光脉冲宽度接近甚至低于声子寿命(大约10 ns);脉冲调制系统消光比不足导致的连续光泄露等,将会使散射谱变得越来越宽,有向高斯线形逐步逼近的趋势,此时布里渊散射谱形状会介于洛伦兹型曲线和高斯型函数曲线之间,所以采用高斯线形和洛伦兹线形的线性权重组合作为匹配布里渊散射谱的基函数^[11]

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

式中 k 是线性权重系数, ν_B 是中心频移, $\Delta\nu_{B1}$ 是洛伦兹谱线宽, $\Delta\nu_{B2}$ 是高斯谱线宽。

目前普遍使用的布里渊散射谱探测方法为扫频法,如图1所示。通过在一定的频率范围内,按照一定的频率间隔,依次获得布里渊散射谱中各频率点对应的整根传感光纤各位置处的光功率,进而通过对传感光纤特定位置处的光功率进行曲线拟合而得到该位置处的布里渊散射谱。

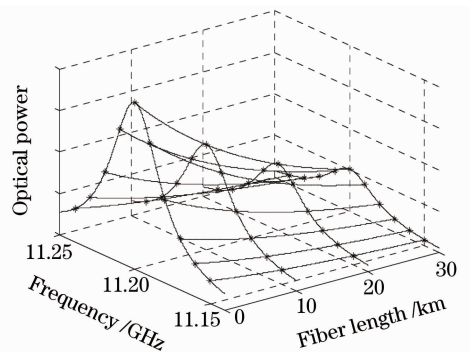


图1 基于扫频法的布里渊散射谱测量过程
Fig. 1 Brillouin spectrum measurement based on frequency domain sweeping

在基于布里渊效应的光纤分布式传感系统中,

温度与应变等物理参数是主要的被测量,且与布里渊频移和布里渊光功率变化呈线性关系,它们主要是通过测量对应的布里渊谱频偏和光功率相对变化量得到的。对于波长工作在 1550 nm 左右的 G652 光纤,温度为 300 K 时,布里渊频移量为 $(0.0483 \pm 0.0004) \text{ MHz}/\mu\text{E}$, $(1.10 \pm 0.02) \text{ MHz}/\text{K}$ ^[15]。

2.2 混合优化算法

当实验所得光功率的幅值与算法拟合所得曲线(基函数)的幅值之差的平方和 $r^2 = \sum_{i=0}^{m-1} [y_i - f_B(x_i)]^2$ 达到最小时,基函数与散射谱数据的拟合度最高,此时基函数的峰值所对应的频率即为实际布里渊散射谱的中心频率。当被测量(如温度、应变等)引起布里渊频率漂移时,散射谱数据发生变化,基函数的峰值所对应的散射谱中心频率也随之变化,因此可由基函数频率的平移量得到布里渊频偏量。

2.2.1 PSO 算法

PSO 算法中的粒子在迭代搜索过程中,通过跟踪群体 2 个极值——个体最优解和群体最优解,来完成对问题的寻优。粒子本身根据速度更新公式

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij} + c_1 r_1 [P_{\text{best}}^i(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2 [G_{\text{best}}^i(t) - x_{ij}(t)] \quad (3)$$

和位置更新公式

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (4)$$

对个体最优解 P_{best} 和群体最优解 G_{best} 进行位置和速度的动态调整和进化。式中 $c_{1,2}$ 为加速度常数(学习速率), $r_{1,2}$ 为 $[0,1]$ 均匀分布的随机数, v_{ij} 为第 i 个粒子第 j 个参数的当前速度, x_{ij} 为第 i 个粒子第 j 个参数的当前位置。

尽管没有遗传算法^[16]、人工神经网络算法^[17]等这些早期的算法成熟,但是以 PSO 算法为代表的群算法自提出以来,以其稳健性、分布性、自适应性、快速性和协作性等特点得到了较快的发展。

2.2.2 L-M 算法

L-M 算法^[18]吸收了高斯-牛顿法局部收敛和最速下降法全局收敛的优点,是非常有效的非线性模型参数估计方法。

L-M 算法利用等式:

$$(\mathbf{H} + \mu\mathbf{I})(\mathbf{A}_{k+1} - \mathbf{A}_k) = -\mathbf{J}^T \Delta f. \quad (5)$$

由 $k, \nu_B, \Delta\nu_{B1}, \Delta\nu_{B2}$ 组成的待估向量 \mathbf{A} 的迭代表达式为

$$\mathbf{A}_{k+1} = \mathbf{A}_k - (\mathbf{H} + \mu\mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \Delta f, \quad (6)$$

式中 \mathbf{J} 是雅可比矩阵, $\mathbf{J} = [y_i - f_{\text{FBG}}(y_i, \mathbf{A})]^T \mathbf{R}^{-1} [y_i - f_{\text{FBG}}(y_i, \mathbf{A})]$, \mathbf{R} 是对角阵,第 i 个元素 $R_{ii} = \sigma_i^2$

为数据点 y_i 的标准方差, $\mathbf{H}(x) = \mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 是 Hessian 矩阵, $\Delta f = y_i - f_{\text{FBG}}(x_i, \mathbf{A})$, \mathbf{I} 是单位阵, k 是迭代次数, μ 是阻尼因子。

L-M 算法可以交替变化,当方法进展良好时可以取 μ 较小,进而成为类牛顿步长,局部收敛速度大大加快;当方法进展较差时可以取较大的 μ 从而成为最速下降步长,可进行全局搜索。

2.2.3 混合优化算法

针对 PSO 算法和 L-M 算法各自的优缺点,提出了一种基于 PSO 和 L-M 算法的新的混合算法,该混合算法首先利用 PSO 算法的(3)和(4)式对粒子的速度和位置不断更新,经过多次迭代,最后得到一组粗调的全局最优解,再以该全局最优解作为 L-M 算法的初值赋予 L-M 的迭代式(6)式,再经过运算,最终得到一组待估参数的最优解,并将其作为运算结果输出。该算法克服了 PSO 算法过早收敛于局部极值和 L-M 算法依赖初值的问题,并将 PSO 算法的全局搜索能力和 L-M 算法的局部收敛能力结合在一起。新算法保证了求解的速度和精度,这样就为在光纤分布式传感系统后端数据处理中高分辨准确提取温度、应变等信息提供了可能,这种新的拟合算法对于温度和应变的高精度测量是十分有益的。

3 数值分析

假设布里渊传感散射谱中心频率为 11.203 GHz 时,线宽分别为 100、80、60、40 MHz,洛伦兹谱和高斯谱的线性权重比 Q 分别为 9:1、8:2、7:3、6:4 时,通过在理论布里渊传感散射谱曲线上叠加信噪比(SNR)为 20 dB 的高斯白噪声,可得到仿真频谱如图 2 所示。图中横坐标为布里渊频移 ν_B ,纵坐标为归一化布里渊增益。

表 1 为在线性权重比为 9:1 的情况下,对不同线宽的散射谱进行拟合所得结果。从表中可以看出新的混合算法在不同线宽和不同 SNR 的情况下对传感散射仿真谱进行参数估计是非常适用和有效的。

在布里渊频偏量解调中,之所以采用 L-M 算法是因为它的计算精度高,但是对初值的依赖也使它存在一些不足之处,例如,在大测量范围的布里渊频偏量解调时,无法准确地对 L-M 算法赋予初值,但是 L-M 算法初值是否合适直接影响到频偏量的准确度。图 3 为 SNR 为 10 dB 的情况下,当测量范围为 200 MHz 时,随着赋予的初值与模型真值差距的加大,L-M 算法的误差随之变大。

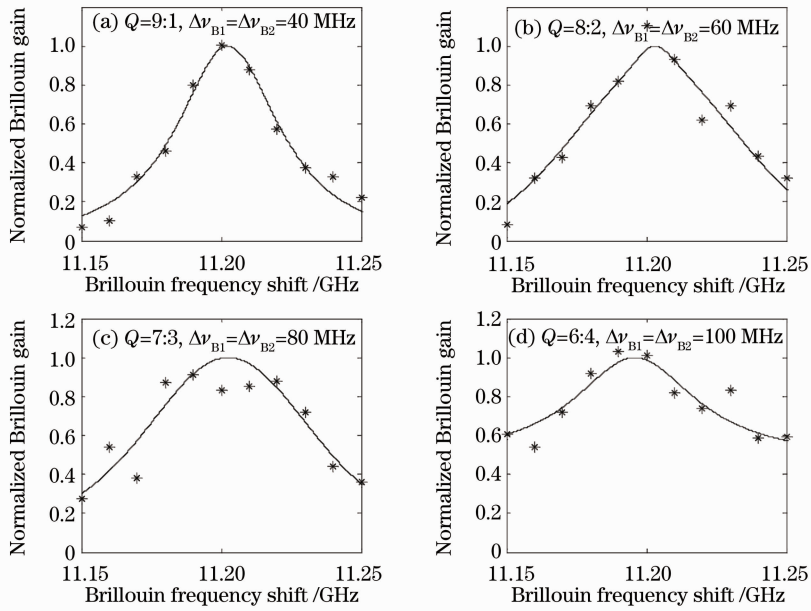


图 2 不同情况下布里渊散射谱的拟合曲线

Fig. 2 Fitting results of Brillouin spectrum of different situations

表 1 不同参数下得到的拟合结果

Table 1 Parameters of different situations

SNR /dB	Linewidth /MHz	Brillouin frequency error /GHz	Temperature error /K	R^2	MAD
10	40	11.20596	2.206	0.384355	0.188142
	60	11.20669	2.231	0.502536	0.175431
	80	11.20770	2.194	0.377748	0.191085
	100	11.20804	2.200	0.421361	0.186100
20	40	11.20427	1.134	0.943850	0.0568322
	60	11.20458	1.108	0.945242	0.0570800
	80	11.20483	1.137	0.943988	0.0570388
	100	11.20515	1.123	0.943245	0.0581198
30	40	11.20346	0.4144	0.994650	0.0179312
	60	11.20355	0.4742	0.994544	0.0183102
	80	11.20365	0.4624	0.994435	0.0181764
	100	11.20377	0.4310	0.994398	0.0182369

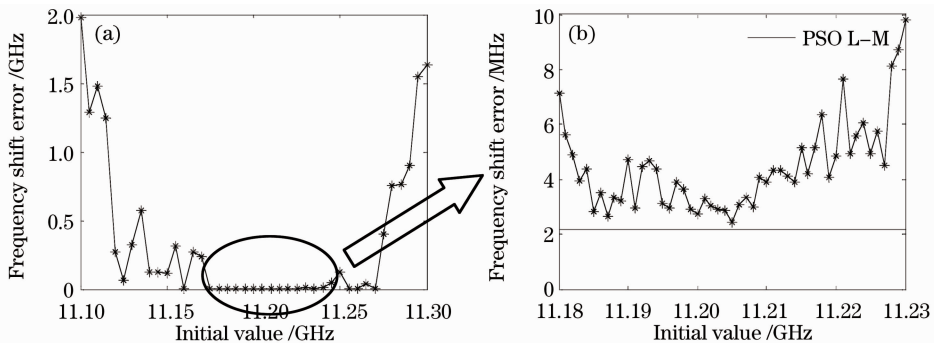


图 3 不同初始值情况下的新算法与 L-M 算法的绝对误差比较

Fig. 3 Comparison of absolute error with different initial values

而新算法可以在较大范围内保证精度,由图 3(b)可见误差不随初值发生变化。所以在不同

初值和低 SNR 情况下新算法的精度均优于 L-M 算法。而且当 SNR 为 10 dB 时,对应的频率分辨率为

15.905 MHz(温度分辨率为 14.201 K),所以绝对误差 2.18838 MHz 在现实应用中是可以接受的。

PSO 算法可用于大测量范围的布里渊频偏量解调,但是其计算精度低,且容易出现“早熟”现象,带有一定的随机性。如图 4 所示,对新算法和 PSO 算法在不同 SNR 下进行布里渊频移的误差的比较,可见在不同 SNR 下新算法的误差均小于 PSO 算法,可以明显提高 PSO 算法的精度。

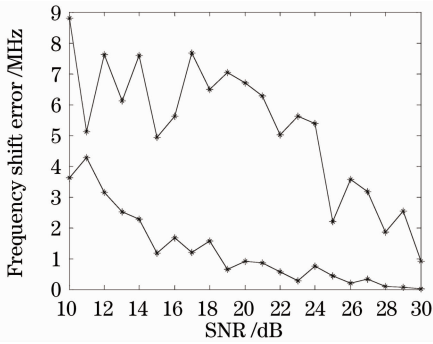


图 4 不同 SNR 情况下布里渊频移误差的比较

Fig.4 Brillouin frequency shift error of different SNRs

虽然 PSO 算法结构简单、处理时间相对较短,但是容易收敛于局部极值,难以满足高精度解调的要求。如表 2 所示,新算法尽管在处理时间上稍稍劣于 PSO 算法,但是克服 PSO 算法的缺点,且与 L-

M 算法相比处理时间大大缩短。

表 2 相同迭代次数下不同算法的相对处理时间

Table 2 Relative processing-time of different algorithms with the same iteration

Different algorithms	L-M	PSO	Hybrid algorithm
Relative process-time	100%	21.21%	28.96%

4 实 验

为验证新算法的有效性,搭建了布里渊散射谱测量系统,实验原理框图如图 5 所示,采用线宽为 9 kHz 的分布反馈式半导体激光器 (DFB-LD) 作为光源,通过分光比为 9:1 保偏光纤耦合器进行功率分配,一路光作为激励光,经声光调制器 (AOM) 分别调制成脉宽为 Δs ,重复频率为 2 kHz 的光脉冲,经掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后,通过环形器注入到单模传感光纤中;另一路光通过电光强度调制器 (EOIM),产生与中心频率差值约为布里渊频移的 1 阶光边带带作为本地参考光,并与由传感光纤返回的布里渊后向散射光进行相干外差检测。通过 PD 进行光电转换后进行高速模拟数字转换 (A/D) 采样,经过数字平均累加得到布里渊散射谱范围内对应的 30 km 传感光纤的光功率分布曲线,进而得到光纤沿途传感散射谱。

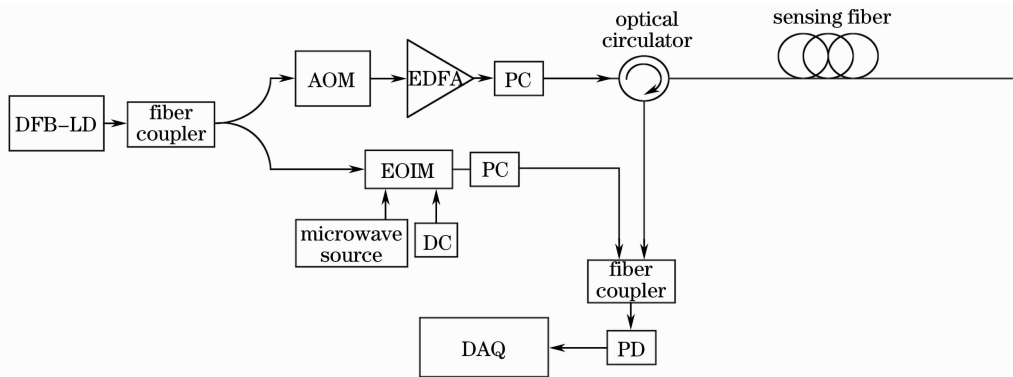


图 5 分布式光纤传感布里渊散射谱测量系统

Fig.5 Distributed optical sensing system based on Brillouin scattering

常温下搭建布里渊散射谱测量系统,将整根传感光纤放入恒温箱中,设定为室温 293 K。调整脉冲调制系统的脉宽 Δs 分别为 10、30、50、100 ns 时,在叠加次数 $n=56、512$ 和 4096 的情况下使用混合优化算法对传感光纤 10 km 处的布里渊散射谱实验数据进行拟合,分别如图 6~8 所示。

从表 3 中可以看出在叠加 56 次情况下的拟合结果与叠加 4096 次的结果相差无几,与通过频谱仪得到的布里渊中心频移示值 10.646 GHz 相近。充

分表明了该算法在相对低 SNR 情况下是适用的,且参数估计效果较好。

将脉冲调制系统的脉宽设置为 100 ns,温控箱温度以 4 K 为一个步长由 293 K 上升至 393 K,在不同温度下得到整根光纤的布里渊中心频率并进行线性回归分析,图 9 显示了温度与布里渊频移之间的相互关系。评价指标拟合度 R^2 、均方根误差 (RMSE) 和布里渊温度频移系数如表 4 所示。

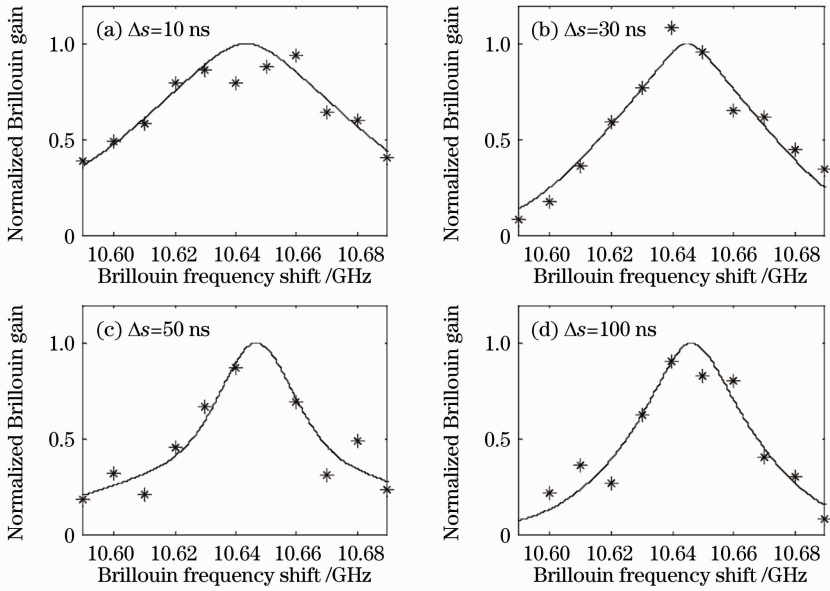


图 6 $n=56$ 时不同脉宽下混合算法得到的布里渊散射谱拟合曲线

Fig. 6 Brillouin scattering fitting results of different pulse widths when $n=56$

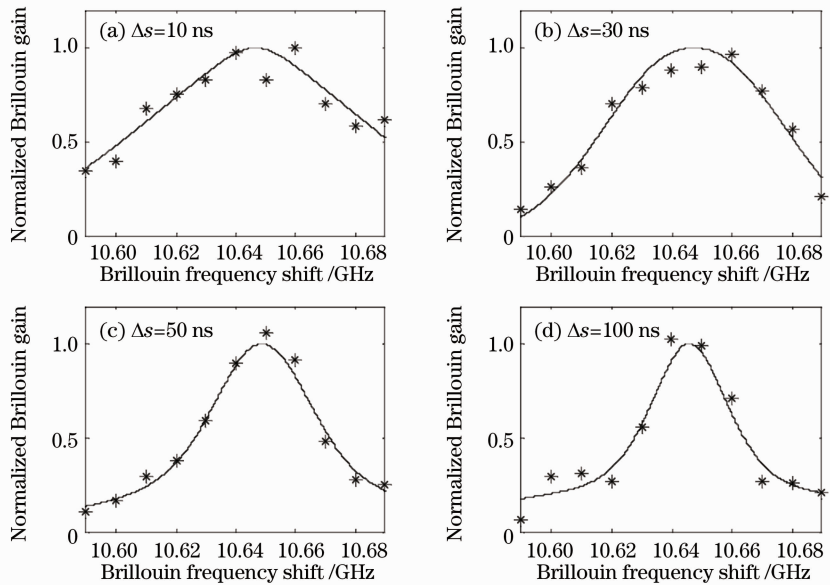


图 7 $n=512$ 时不同脉宽下混合算法得到的布里渊散射谱拟合曲线

Fig. 7 Brillouin scattering fitting results of different pulse widths when $n=512$

表 3 不同参数下得到的拟合结果

Table 3 Parameters of different situations

unit: GHz

n	10 ns	30 ns	50 ns	100 ns
56	10.6425	10.6449	10.6478	10.6465
512	10.6453	10.6463	10.6457	10.6444
4096	10.6461	10.6462	10.6449	10.6459

从表 4 中可以看出,利用整根光纤的布里渊损耗谱的中心频率与温度成近似线性关系,得到的频移温度系数(FST)为 1.120130 MHz/K,与文献[15]比较符合,考虑到实验条件的差异以及温度定标设备存在的误差,基本可以认为该算法是可行、有

效的。

表 4 评价指标

Table 4 Evaluation indexes

Parameters	R^2	RMSE	FST coefficient
	0.99263	0.90865×10^{-3}	1.120130 MHz/K

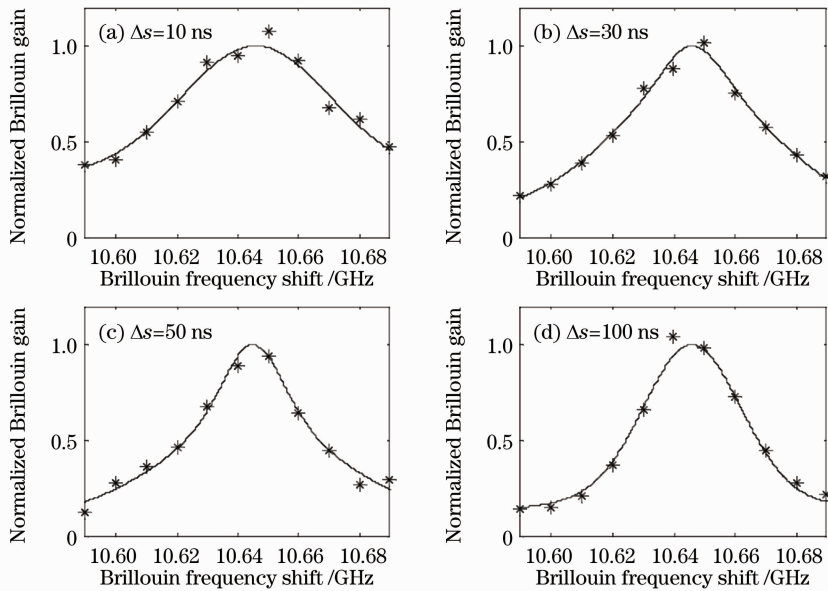


图 8 $n=4096$ 时不同脉宽下混合算法得到的布里渊散射谱拟合曲线

Fig. 8 Brillouin scattering fitting results of different pulse widths when $n=4096$

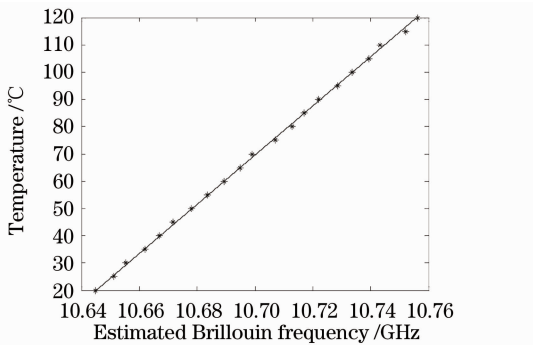


图 9 温度和布里渊频移的散点分布图

Fig. 9 Scatter plots of the temperature and Brillouin frequency shift

5 结 论

通过对基于 PSO 和 L-M 混合优化算法进行了详细分析,得出在 SNR 为 10 dB 时绝对误差为 2.18838 MHz(温度绝对误差为 1.95 K),所以该算法可以在低 SNR 的情况下清晰地反映出光纤中温度的变化信息。利用混合算法运算速度快,拟合精度高,不需要依赖于初值的优势,对传感布里渊散射谱的高精度特征提取将有利于布里渊光纤传感系统后端温度或应变等传感信息的快速准确预测,对高精度分布式传感系统的研制是有益的。

参 考 文 献

1 Hong Xiaobin, Guo Hongxiang, Wu Jian. A Brillouin optical time domain analysis based distributed fiber optic intrusion sensor system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1037~1041

洪小斌, 郭宏翔, 伍 剑. 基于布里渊时域分析的分布式光纤传感入侵定位系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1037~1041

2 Feng Chunyuan, Rao Zhongyang, Jin Yongxing *et al.*. Research of Raman spectrum in liquid optical fiber[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2011, **23**(1): 33~36

冯春媛, 饶中洋, 金永兴 等. 有机液芯光纤拉曼谱测量的研究[J]. *光散射学报*, 2011, **2**(1): 33~36

3 Yongkang Dong, Xiaoyi Bao, Liang Chen. Distributed temperature sensing based on birefringence effect on transient Brillouin grating in a polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(17): 2590~2592

4 Li Ke, Shi Bin, Tang Chaosheng *et al.*. Feasibility research on soil deformation monitoring with distributed optical fiber sensing technique [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(6): 1781~1785

李 科, 施 斌, 唐朝生 等. 黏性土体干缩变形分布式光纤检测试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(6): 1781~1785

5 M. Alahbabi, Y. T. Cho, T. P. Newson. Comparison of the methods for discriminating temperature and strain in spontaneous Brillouin-based distributed sensors[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 26~28

6 Natsuki Nitta, Mitsuhiro Tateda, Takashige Omatsu. Spatial resolution enhancement in BOTDR by spectrum separation method[J]. *Opt. Rev.*, 2002, **9**(2): 49~53

7 Song Muping, Li Zhicheng, Qiu Chao. A 50 km distributed optical fiber sensor based on Brillouin optical time-domain analyzer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1426~1429

宋牟平, 励志成, 裘 超. 50 km 长距离布里渊光时域分析分布式光纤传感器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1426~1429

8 Xinhong Jia, Yunjiang Rao, Kun Deng *et al.*. Experimental demonstration on 2.5-m spatial resolution and 1 °C temperature uncertainty over long-distance BOTDA with combined Raman amplification and optical pulse coding [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(7): 435~437

9 Gabriele Bolognini, Marcelo A. Soto. Optical pulse coding in hybrid distributed sensing based on Raman and Brillouin scattering employing Fabry-Perot lasers[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(8): 8459~8465

10 Qingsong Cui, Sibel Pamukcu, Aoxiang Lin *et al.*. Distributed temperature sensing system based on Rayleigh scattering BOTDA

- [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(2): 399~403
- 11 Xiao Shanghui, Li Li. New fitting method for Brillouin-based scattering spectrum of fibre-optic distributed sensing systems[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(6): 897~900
肖尚辉, 李立. 一种新的光纤布里渊传感散射谱拟合方法[J]. *光学技术*, 2009, **35**(6): 897~900
- 12 Liu Diren, Song Muping, Zhang Xianmin *et al.*. Influence of stress gradient on measurement accuracy of Brillouin optical time-domain-reflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 501~505
刘迪仁, 宋牟平, 章献民等. 应变梯度对布里渊光时域反射计测量精度的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 501~505
- 13 Marc Nikles, Luc Thevenaz, Philippe A. Robert. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(10): 1842~1851
- 14 Cheng Guangxu. Raman and Brillouin Scattering[M]. Beijing: Science Press, 2008. 24~43
程光煦. 拉曼布里渊散射[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 24~43
- 15 Song Muping, Bao Chong, Qiu Chao *et al.*. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 650~654
宋牟平, 鲍翀, 裘超等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射的分布式光纤传感器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 650~654
- 16 Yindi Huang, Ronghua Bian, Zhen Xu. Sequencing mixed model assembly lines based on genetic algorithm optimization [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **279**: 412~417
- 17 Whei-Min Lin, Chih-Ming Hong, Ting-Chia Ou *et al.*. Hybrid intelligent control of PMSG wind generation system using pitch angle control with RBFN [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, **52**: 1244~1251
- 18 A. Kleefeld, M. Reiel. The Levenberg-Marquardt method applied to a parameter estimation problem arising from electrical resistivity tomography [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2011, **217**(9): 4490~4501

栏目编辑:李文喆