

# 基于径向基函数神经网络的传感布里渊散射谱特征提取

刘 银 付广伟 张燕君 毕卫红

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 基于布里渊效应的分布式光纤传感器以其可在沿光纤中同时获得被测量场时间和空间上的连续分布信息, 成为当前国际的研究热点。根据光纤中布里渊散射谱的传输特点和高精度特征提取的要求, 提出了利用莱文伯-马夸特(L-M)算法调节权值的径向基函数神经网络(RBFN)对布里渊散射谱进行特征提取。通过与反向传播(BP)神经网络、五次多项式曲线拟合法和三次样条插值法进行预测比较, 在中心频率为 11.213 GHz, 权重比为 4:1 的仿真散射谱模型中, 本方法相对误差最小, 仅 0.0015179%, 温度相对误差仅为 0.152 °C, 且拟合度较好。在不同脉宽和不同温度下的同一检测系统中, 前者的综合评价指标优于其他三种拟合方法。数值分析和实验研究均表明径向基函数神经网络适用于对布里渊散射谱进行拟合, 有效提高了预测精度。

**关键词** 光纤光学; 布里渊散射谱; 径向基函数神经网络; 拟合; 分布式光纤传感器

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0206002

## A Novel Method for Brillouin Scattering Spectrum of Distributed Sensing Systems Based on Radial Basis Function Neural Networks to Extract Features

Liu Yin Fu Guangwei Zhang Yanjun Bi Weihong

(College of Information Science and Engineering, Yanshan University,  
Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** Distributed optical fiber sensing system based on Brillouin scattering has attracted wide attention for its ability of sensing the measured field by detecting the continuously distributed information in time and space. Considering the trait of the spectral shape variance during the Brillouin scattering process in optical fiber and the requirement of high accuracy, a novel method based on radial basis function neural (RBFN) networks in which the output layer weights are adjusted by Levenberg-Marquardt method is presented. A model of actual Brillouin spectrum is constructed by Gaussian white noise on the theoretical spectrum, the core frequency is 11.213 GHz and the weight is 4:1. Comparing the proposed algorithm with traditional back propagation (BP) neural networks, polynomial five times curve fitting and piecewise cubic spline interpolation, the relative error of the new method is 0.0015179% and the temperature error is 0.152 °C. The appraised parameters are better than other three algorithms at the same test system under different pulse widths and temperatures. The numerical and experimental results show that the RBFN networks is suitable for the fitting of Brillouin scattering spectrum, and the forecast accuracy is improved efficiently.

**Key words** fiber optics; Brillouin scattering spectrum; radial basis function neural (RBFN) networks; fitting method; distributed fiber sensors

**OCIS codes** 290.5830; 200.4260; 300.6210

**收稿日期**: 2011-07-11; **收到修改稿日期**: 2011-09-02

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB327801)和河北省科技支撑计划(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, 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)

# 1 引 言

在通信光缆、电力电缆、大坝、隧道和输油管道等大型的工程项目和基础设施建设中如果需要确定温度或应变的沿途分布<sup>[1]</sup>,就需要采用分布式光纤传感系统进行测量。光时域反射(OTDR)技术被认为是分布式光纤传感器诞生的标志,与其相对应的技术称之为分布式光纤传感技术。分布式光纤传感技术(DOFS)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,不仅具有一般光纤传感器的优点,而且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,显示出重大的实用价值和极其广阔的应用前景。基于布里渊效应的分布式光纤传感技术<sup>[2~4]</sup>主要是利用了光波在光纤中传播时产生的后向散射光的频移谱、功率谱特征与外界环境(温度、应变等)的相互关系,通过获得频偏值和相对功率变化量,最终得到外界环境相关参数。目前已有许多国内外研究机构在基于布里渊效应的分布式光纤传感系统中提出了各种布里渊散射谱拟合方案,如莱文伯-马夸特(L-M)非线性最小二乘法<sup>[5]</sup>和五次多项式拟合法<sup>[6]</sup>等。

为了进一步提高精确度,本文采用径向基函数神经网络(RBFN)网络对传感布里渊散射谱进行数据处理,因其自身的结构特性决定了它训练起来要比反向传播(BP)网络简单,具有较快的收敛速度,有利于布里渊光纤传感系统后端温度或应力等传感信息的高分辨提取,仿真和实验结果同时证明了该方法的适用性。

# 2 原 理

## 2.1 布里渊谱传输特性与测量原理

一般情况下,假定光纤中的声波以指数形式衰减,由于光纤中光的传输特性致使布里渊散射谱  $g_B(\nu)$  以布里渊频移  $\nu_B$  为中心,增益谱半峰全宽  $\Delta\nu_B \approx \frac{1}{\pi\Gamma_B}$ ,  $\Gamma_B$  为声子寿命,它通常具有洛仑兹(Lorentz)型函数曲线<sup>[7]</sup>,

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

但由于多方面原因如:

- 1) 光在光纤中传输会发生自然展宽、多普勒展宽等现象<sup>[8]</sup>;
- 2) 注入传感光纤的光脉冲宽度变窄,导致其接近甚至低于声子寿命(大约 10 ns)<sup>[5]</sup>;
- 3) 脉冲调制系统消光比不足导致的连续光泄露<sup>[5]</sup>。

在这些情况下,布里渊散射谱将会变得越来越宽,有向高斯(Gauss)线形逐步逼近的趋势,此时布里渊散射谱形状会介于 Lorentz 型曲线和 Gauss 型函数曲线之间,如图 1 所示实际谱线是 Gauss 线形和 Lorentz 线形的线性权重组合。

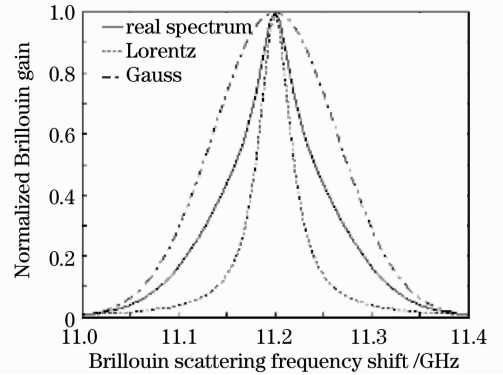


图 1 布里渊散射谱

Fig. 1 Brillouin scattering spectrum

在基于布里渊效应的分布式光纤传感系统中,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<sup>[9~11]</sup>得到的。布里渊频移  $\nu_B$  是温度和应变的函数,与温度  $T$ 、应变  $\epsilon$  的线性关系<sup>[12,13]</sup>为

$$\nu_B(\epsilon) = \nu_B(0)(1 + C_\epsilon\epsilon), \quad (2)$$

$$\nu_B(T) = \nu_B(T_0)[1 + C_T(T - T_0)], \quad (3)$$

式中  $C_\epsilon, C_T$  分别是布里渊传感的应变和温度的比例系数,  $T_0$  是参考温度。对于波长工作在 1550 nm 左右的普通单模光纤(SMF),温度为 300 K 时,布里渊频移变化为

$$\Delta\nu_B = C_{\epsilon} \Delta\epsilon + C_{T} \Delta T, \quad (4)$$

式中  $C_{\epsilon} = (0.0483 \pm 0.0004) \text{ MHz}/\mu\epsilon$  为应变布里渊频移系数,  $C_T = (1.10 \pm 0.02) \text{ MHz}/\text{K}$  为温度布里渊频移系数。

## 2.2 基于 L-M 算法调节权值的 RBFN 网络

人工神经网络是一种并行处理的非线性映射,现已是工程技术领域数据处理的极为有效的工具之一。径向基函数神经网络<sup>[14]</sup>(RBFN)是 20 世纪 80 年代末期提出的一种人工神经网络结构,由于具有全局逼近、训练方法快速和不存在局部最优问题等优点成为近年来研究的热点。如图 2 所示 RBFN 是一种三层前馈式神经网络,第一层是输入层,第二层是隐层,第三层是输出层,它的隐层激励函数是一种径向对称的核函数,一般取高斯核函数,输出节点对隐层节点的输出进行线性加权,从而实现输入空

间到输出空间的映射,使整个网络达到函数逼近的目的。与BP神经网络不同的是RBFN的输出层节点是线性的。

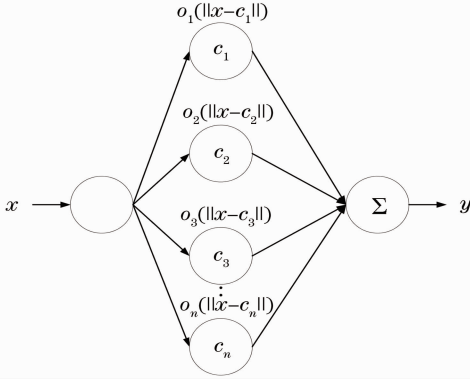


图2 RBFN网络结构

Fig. 2 Architecture of RBFN

根据布里渊光纤传感散射谱试验数据建立网络模型,设  $x$  是一维输入向量,对应于布里渊散射谱试验数据中的扫频中心频率,  $y$  是一维输出量,对应于布里渊散射谱试验数据中的归一化布里渊光功率。

对于隐层径向基函数采用 Gauss 核函数时,第  $i$  个隐层节点的输出为

$$o_i(\|x - c_i\|) = \exp\left(\frac{-\|x - c_i\|^2}{\delta_i^2}\right), \quad (5)$$

式中  $c_i$  为第  $i$  个隐层节点激励函数的中心,  $\delta_i$  为第  $i$  个隐层节点激励函数的宽度,整个网络的输出方程为

$$y = \sum_{i=1}^n \omega_i o_i(\|x - c_i\|) = \sum_{i=1}^n \omega_i \exp\left(\frac{-\|x - c_i\|^2}{\delta_i^2}\right), \quad (6)$$

式中  $\omega_i$  输出节点与第  $i$  个隐层节点的连接权值,  $n$  为隐层节点的个数。

RBFN神经网络要学习的参数有三个:径向基函数的中心、宽度、隐层与输出层的连接权值。本文的学习算法采用自组织选取中心法,有两个学习阶段组成:自组织学习阶段,学习隐层基函数的中心和方差,为隐层径向基函数估计一个合适的位置;有监督学习阶段,学习隐层与输出层连接权值,完成神经网络的设计。由于  $k$ -均值聚类算法的局限在于只能达到依赖于所选中心初值的局部最优解,因此隐层中心采用对少数样本简单有效的增强  $k$ -均值聚类算法,它建立在变差加权度量的聚类基础上,可使算法收敛于一个最优结果,与中心初始位置无关。用凑试法确定宽度,采用L-M算法调节隐层到输出层的权值。

确定连接权值的问题转变为求测量值和预测值

差的平方和  $r^2 = \sum_{i=0}^{m-1} [y - y(\omega_i)]^2$  最小化的解。

L-M算法<sup>[15]</sup>利用等式

$$[H + \mu I](\omega_{k+1} - \omega_k) = -J^T \Delta y, \quad (7)$$

待估权值  $\omega$  的迭代表达式为

$$\omega_{k+1} = \omega_k - [H + \mu I]^{-1} J^T \Delta y, \quad (8)$$

式中  $J$  是 Jacobian 矩阵,  $J = [y - y(\omega_i)]^T R^{-1} [y - y(\omega_i)]$ ,  $R$  是对角阵,第  $i$  个元素  $R_{ii} = \sigma_i^2$  为数据点  $y(\omega_i)$  的标准方差,  $H(x) = J^T J$  是 Hessian 矩阵,  $\Delta f = y - y(\omega_i)$ ,  $I$  是单位阵,  $k$  是迭代次数,  $\mu$  是阻尼因子。

当阻尼因子  $\mu \rightarrow 0$  时,上式可近似为二阶局部收敛的高斯-牛顿法,当阻尼因子  $\mu \rightarrow \infty$  时,上式可近似为线性全局收敛的最速下降法,可进行全局搜索。因此L-M算法同时具备了高斯-牛顿法的局部收敛和最速下降法的全局收敛的优点。

RBFN网络训练速度快,拟合精度高,具有唯一最佳逼近的特性。相对而言,RBFN网络是解决布里渊散射谱拟合问题的有效方法。

### 3 数值模拟与结果分析

假设布里渊传感散射谱中心频率为 11.213 GHz, Lorentz 谱和 Gauss 谱的线性权重比为 4:1,线宽分别为 60 MHz 和 40 MHz,通过在理论布里渊传感散射谱曲线上叠加一定强度的 Gauss 白噪声,可得到仿真频谱如图3所示。图中横坐标为布里渊频移  $\nu_B$ ,纵坐标为归一化布里渊增益  $g_0$ 。

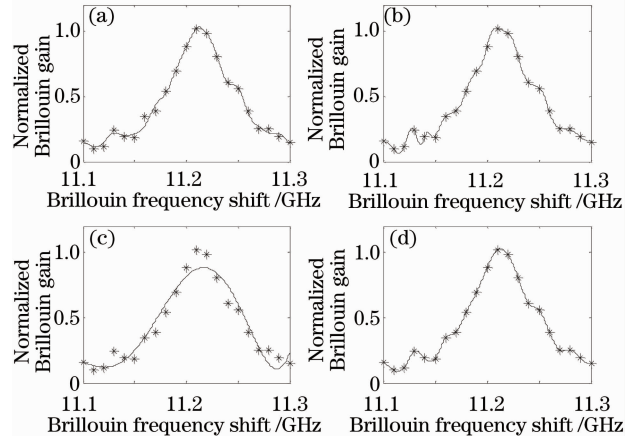


图3 由不同算法得到仿真散射谱的拟合曲线。(a) RBFN网络;(b)BP网络;(c)五次多项式拟合法;(d)三次样条差值法

Fig. 3 Fitting results of simulated scattering spectrum by different algorithms. (a) RBFN networks; (b) BP networks; (c) fifth-order polynomial; (d) cubic spline interpolation

分别利用 4 种算法对信号进行特征提取,结果如表 1 所示。

心频率为 11.2128 GHz, 相对误差最小, 为 0.0015179%, 温度相对误差为 0.152 °C, 且拟合度比较好, 为 0.9818, 故这种方法在理论上是适用的。

由表 1 可以看出经 RBFN 网络拟合得到的中

表 1 比较 4 种算法建模的预测效果

Table 1 Comparison of four algorithms' evaluation indexes

Algorithms	RBFN	BP	P5	CSI
Central frequency /GHz	11.2128	11.2124	11.2135	11.2181
Relative error /%	0.0015179	0.0054464	0.0046429	0.045536
$R^2$	0.9818	0.9767	0.9200	1

## 4 系统设计与实验

为验证本文提出算法的有效性, 搭建了布里渊散射谱测量系统, 如图 4 所示, 传感系统采用线宽小于 50 kHz 的分布反馈式半导体激光器 (DFB-LD), 输出波长为 1550.74 nm, 输出功率为 10 mW; 通过保偏光纤耦合器进行功率分配, ①路中入射光被脉冲调制系统分别调制成脉宽为  $\Delta s$ , 重复频率为 2 kHz 的光脉冲, 经掺铒光纤放大器 (EDFA)、光栅滤波器 (FBGF) 和可调光衰减器 (VOA), 通过环形器后输入到 30 km 的普通单模光纤中。由于发生受激布里渊散射时, 斯托克斯光强度大于瑞利散射光, 占据大部分的能量, 并且此时受激布里渊散射发生在传感光纤的始端, 使得后向散射光中的大部分能量集中在光纤始端, 沿光纤长度散射光强迅速下

降, 传感距离较短, 所以输入脉冲光平均功率不应大于受激布里渊散射阈值。②路作为参考光路, 由铌酸锂电光强度调制器 (EOIM) 调制产生若干边波带, 由与基带差值为布里渊频移的 1 阶光边波带作为本地参考光进行光扫频, 通过扰偏器 (PS) 后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, 最后将由光电探测器输出的电信号通过电频谱分析仪 (ESA) 可得到布里渊传感散射谱。由于普通光纤存在双折射效应, 且其受温度、应力等环境因素影响, 使光在光纤中传输的偏振态不断地随机变化。因而检测到的信号光强是偏振相关起伏的, 对光纤传感系统的性能产生较大的影响, PS 的作用就是扰乱光的偏振态, 使扰偏后的光信号偏振态接近随机特性。

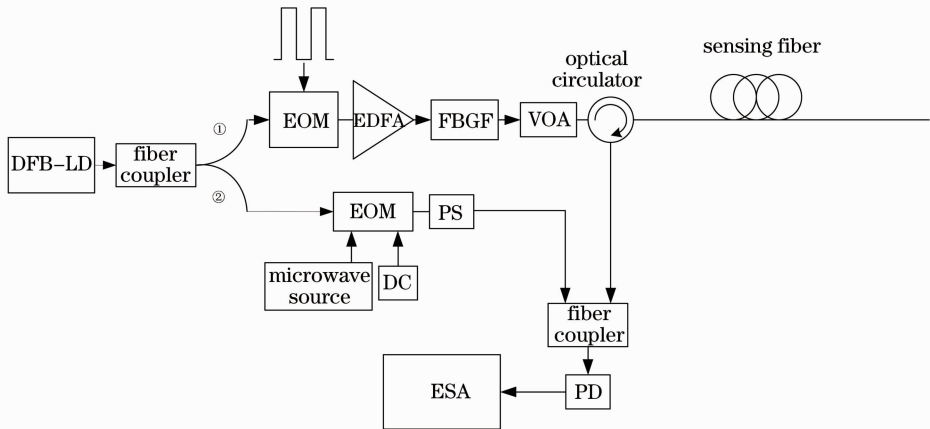


图 4 分布式光纤传感布里渊散射谱测量系统

Fig. 4 Measurement arrangement of Brillouin scattering spectrum with distributed optical sensor

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 25 °C。调整脉冲调制系统的脉宽  $\Delta s$  分别为 10, 30, 50 和 100 ns, 从频谱仪上经过数字平均累加后, 获取光纤布里渊散射谱, 分别利用 4 种算法进行拟合, 如图 5~8 所示。

效果的指标, 如表 2 所示。

比较 4 种算法建模的预测效果. 预测均方根误差 (RMSEP) 与平均绝对偏差 (MAD) 作为评价拟合

实验结果显示, 虽然使用三次样条插值法得到的 RMSEP 和 MAD 均为 0, 但根据其拟合机理以及上文的仿真表明其性能却劣于其他算法。RBFN 网络的各项指标要好于采用 BP 神经网络得到的指标, 而采用神经网络对散射谱进行特征提取比采用五次多项式拟合法的预测效果要好。

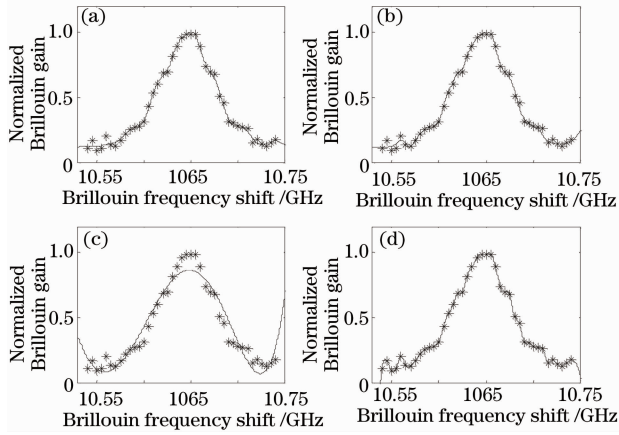


图 5 脉宽为 10 ns 时不同算法得到的布里渊散射谱拟合曲线。(a) RBFN 网络；(b) BP 网络；(c) 五次多项式拟合法；(d) 三次样条差值法

Fig. 5 Fitting results of Brillouin scattering spectrum by different algorithms when the pulse width is 10 ns. (a) RBFN networks; (b) BP networks; (c) fifth-order polynomial; (d) cubic spline interpolation

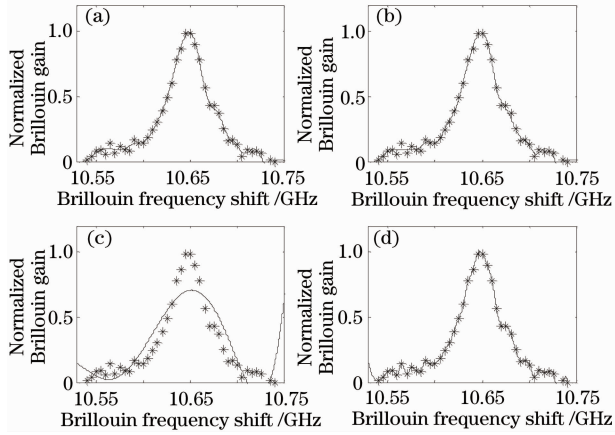


图 6 脉宽为 30 ns 时不同算法得到的布里渊散射谱拟合曲线。(a) RBFN 网络；(b) BP 网络；(c) 五次多项式拟合法；(d) 三次样条差值法

Fig. 6 Fitting results of Brillouin scattering spectrum by different algorithms when the pulse width is 30 ns. (a) RBFN networks; (b) BP networks; (c) fifth-order polynomial; (d) cubic spline interpolation

调整脉冲调制系统的脉宽  $\Delta s$  为 50 ns, 将恒温箱的温度从 20  $^{\circ}\text{C}$ , 以 5  $^{\circ}\text{C}$  为一个调节步长升温至 120  $^{\circ}\text{C}$ 。对获取的布里渊散射谱分别利用 4 种算法进行特征提取, 如图 9 所示。

由表 3 可以看出使用 BP 网络的测量时间要远远大于 RBFN 网络, 且 RMSEP 劣于 RBFN 网络, RBFN 网络在上述两项指标的比较中均优于五次多项式拟合法和三次样条插值法。所以综合实际情况, RBFN 网络的预测效果最优, 经过 RBFN 网络

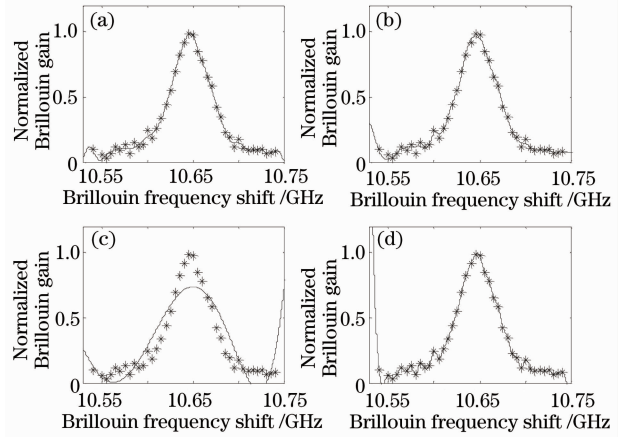


图 7 脉宽为 50 ns 时不同算法得到的布里渊散射谱拟合曲线。(a) RBFN 网络；(b) BP 网络；(c) 五次多项式拟合法；(d) 三次样条差值法

Fig. 7 Fitting results of Brillouin scattering spectrum by different algorithms when the pulse width is 50 ns. (a) RBFN networks; (b) BP networks; (c) fifth-order polynomial; (d) cubic spline interpolation

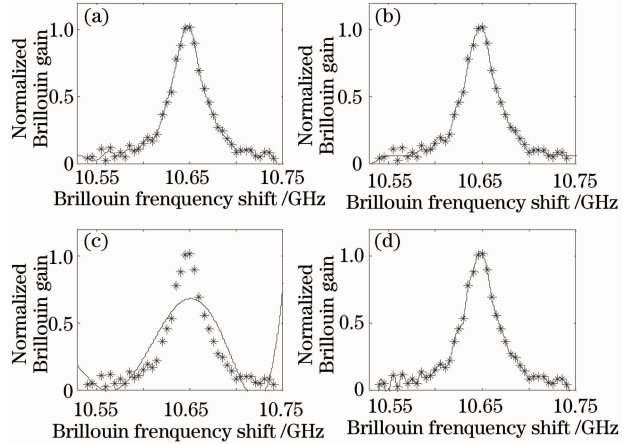


图 8 脉宽为 100 ns 时不同算法得到的布里渊散射谱拟合曲线。(a) RBFN 网络；(b) BP 网络；(c) 五次多项式拟合法；(d) 三次样条差值法

Fig. 8 Fitting results of Brillouin scattering spectrum by different algorithms when the pulse width is 100 ns. (a) RBFN networks; (b) BP networks; (c) fifth-order polynomial; (d) cubic spline interpolation

拟合后提取散射谱谱特征后的模型质量有所提高, 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。RBFN 网络逼近算法的引入不仅提高了预测精度, 而且考虑到由此带来的与其他算法相比数据处理工作量的降低和预测精度的提高, 这种拟合算法对于温度和应变的高精度测量是十分有益的。

表 2 不同脉宽不同算法下得到的评价指标

Table 2 Evaluation indexes by different algorithms and pulse widths

Pulse width	Parameter	RBFN	BP	P5	CSI
10 ns	RMSEP	0.0177	0.0215	0.1139	0
	MAD	0.0133	0.0164	0.0964	0
30 ns	RMSEP	0.0183	0.0213	0.1182	0
	MAD	0.0118	0.0176	0.1017	0
50 ns	RMSEP	0.0159	0.0206	0.1117	0
	MAD	0.0120	0.0170	0.0924	0
100 ns	RMSEP	0.0195	0.0218	0.1151	0
	MAD	0.0158	0.0171	0.0958	0

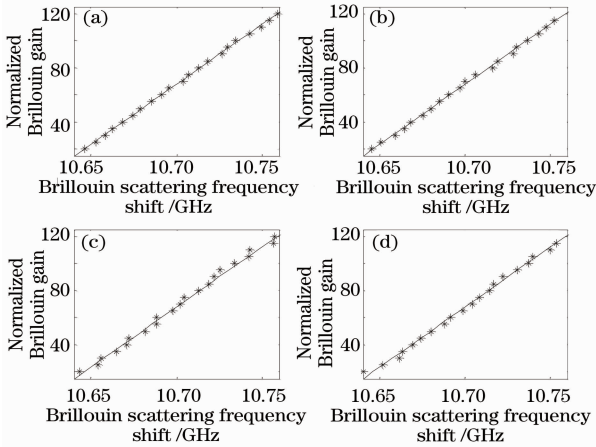


图 9 脉宽为 50 ns 时不同温度下得到的布里渊散射频移。(a) RBFN 网络；(b) BP 网络；(c) 五次多项式拟合法；(d) 三次样条差值法

Fig. 9 Scatter plots of Brillouin scattering frequency shift in different temperature when the pulsedwidth is 50 ns. (a) RBFN networks; (b) BP networks; (c) fifth-order polynomial; (d) cubic spline interpolation

表 3 不同算法间处理效率和 RMSEP 的比较

Table 3 Comparison of processing efficiency and RMSEP of different algorithms

Parameter	RBFN	BP	P5	CSI
RMSEP/ $10^{-2}$	0.120	0.158	0.296	0.303
Relative processing time /%	4.254	100	14.821	14.308

## 5 结 论

RBFN 网络能够有效地处理传感布里渊散射谱数据拟合的问题,为谱特征的高精度提取提供了一个较为实用的工具。通过跟 BP 神经网络、基于最小二乘法的五次多项式拟合法和三次样条插值法及提出的基于径向基函数神经网络的布里渊传感散射谱拟合方法的相互比较,本文所述拟合方法的结果

可以清晰地反映出光纤中温度的变化信息。利用 RBFN 网络训练速度快,拟合精度高的优势,它既解决了基于最小二乘法的拟合方法精度低的问题,又解决了 BP 网络的测量速度问题。相对而言,基于径向基函数神经网络的布里渊传感散射谱模型的建立将对布里渊光纤传感系统传感信息的快速准确提取具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- 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
- Fabien Ravet, Xiaoyi Bao, Jeff Snoddy *et al.*. Characterization of Brillouin fiber generator and amplifier for optimized working condition of distributed sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, **15**(3): 304~309
- 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
- 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
- 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法[J]. *光学技术*, 2009, **35**(6): 897~900
- 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
- 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
- Cheng Guangxu. Raman and Brillouin Scattering [M]. Beijing: Science Press, 2008. 24~26
- 程光照. 拉曼 布里渊散射[J]. 北京: 科学出版社, 2008. 24~43
- Hao Liang, Wenhai Li, Nicolas Linze *et al.*. High-resolution

- DPP-BOTDA over 50 km LEAF using return-to-zero coded pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(10): 1503~1505
- 10 Dong Yuming, Zhang Xuping, Lu Yuangang *et al.*. Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 197~201  
董玉明, 张旭苹, 路元刚 等. 布里渊散射谱光纤传感器的交叉敏感问题[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 197~201
- 11 Natsuki Nitta, Mitsuhiro Tateda, Takashige Omatsu. Spatial resolution enhancement in BOTDR by spectrum separation method [J]. *Opt. Rev.*, 2002, **9**(2): 49~53
- 12 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
- 13 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
- 14 W. Lin, C. Hong, T. 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
- 15 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:何卓铭