光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021092401

基于人工神经网络的智能化架空线路应变快速解调方法

叶明武[1]，钟超逸[1]，张璐娟[1]，郑兴月[1]，雷　雨[1]，赵丽娟[2,3,4]*

（1. 广东电网公司河源供电局，广州 517000；2. 华北电力大学 电子与通信工程系，河北 保定 071003；
3. 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；
4. 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： 为了提高智能化光纤复合架空线路态势感知的实时性，将人工神经网络方法应用于光纤沿线应变解调，确定了神经网络的结构。编程实现了基于洛伦兹模型的最小二乘谱拟合方法和神经网络方法，采用不同信噪比和布里渊频移的布里渊谱训练神经网络，将它们应用于某光纤复合架空线路沿线光纤应变的测量，从不同角度比较了两种方法的计算结果。计算结果表明，神经网络方法能有效获得光纤沿线的布里渊频移进而获得应变，具有与谱拟合方法相似的准确性，但应变解调时间仅约为谱拟合方法的 1/20 000。研究结果为提高智能光纤复合架空线路态势感知的实时性提供了参考。

关键词： 智能化架空线路；布里渊散射；应变；人工神经网络；实时性

中图分类号： TM754　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0188－07

A Fast Strain Demodulation Method for Intelligent Overhead Line Based on Artificial Neural Network

YE Mingwu[1], ZHONG Chaoyi[1], ZHANG Lujuan[1], ZHENG Xingyue[1], LEI Yu[1], ZHAO Lijuan[2,3,4]

(1. Heyuan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 517000, CHN; 2. Dept. of Electronic and Communication Engineering; 3. Hebei Key Lab. of Power Internet of Things Technology; 4. Baoding Key Lab. of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technol., North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: In order to improve the real-time performance in situation awareness of intelligent optical fiber composite overhead line, the artificial neural network (ANN) method is introduced into the strain demodulation along the optical fiber. The structure of the ANN for strain demodulation is determined. The programs of the least-squares spectrum fitting method and ANN method based on Lorentzian model are written. The ANN is trained by the Brillouin spectra with different signal-to-noise ratios (SNRs) and Brillouin frequency shifts. The trained ANN is applied to the optical fiber strain measurement for an optical fiber composite overhead line. The results of the two methods are compared from different aspects. The results indicate that the ANN method can effectively obtain the Brillouin frequency shift along the optical fiber and then obtain the strain, which has the similar accuracy as the spectral fitting method. However, its computation time is much less than that of the spectrum fitting method. The work provides a reference value for improving the real-time performance of situation awareness of intelligent optical fiber composite overhead lines.

Key words: intelligent overhead line; Brillouin scattering; strain; artificial neural network; real-time performance

收稿日期：2021－09－24.

基金项目：河北省自然科学基金项目(E2020502010)；国家自然科学基金项目(62171185)；企业横向项目(GDKJXM20198094).

* **通信作者：**赵丽娟　**E-mail:** hdzlj@126.com

0　引言

光纤通信在电力调度、配网自动化和继电保护等领域发挥着重要作用[1-2]，是确保电网动态调控和稳定运行的基础。随着电力系统的发展，电力光缆，包括光纤复合架空地线（Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire，OPGW）、全介质自承式光缆（All-Dielectric Self-Supporting Cable，ADSS）和光纤复合相线（Opticalphase Conductor，OPPC）[3-4]的应用越来越广泛。这些电力光缆架设于空中，也称为光纤复合架空线路，在实际运行中容易遭受外力破坏[5-10]，导致故障发生。因此，非常有必要监测其运行状态，提前预警故障，减少停电事故的发生。人们开始将这种能感受自身运行状态的架空线路称为智能化架空线路。随着用户对供电可靠性和电能质量要求的提高，监测智能化架空线路状态的研究越来越迫切。

由于这些光纤复合架空线路自带光纤，无需敷设额外的传感器，基于光散射技术即可实现线路沿线温度、应变甚至振动的测量[11]，该技术是实现智能化架空线路的重要方式。在基于布里渊散射的分布式光纤传感技术中，常用布里渊频移[12]来解调温度和应变。目前常用基于最小二乘拟合的方法[13-15]来计算布里渊频移，该种方式的优点是能有效利用整个谱数据，准确性高、抗干扰能力强，但计算速度偏慢。随着计算机技术的发展，近年来人工神经网络方法逐渐在布里渊频移提取方面开始应用，与谱拟合方法不同，该方法无需预先获得布里渊谱满足的模型即可计算布里渊频移[16]。文献[17]提出利用神经网络来提取布里渊频移，针对不同温升裸光纤上的布里渊谱，采用基于洛伦兹模型的谱拟合方法与神经网络方法，比较验证了提出方法的有效性。针对布里渊光时域分析（Brillouin Optical Time Domain Analysis，BOTDA）中测得布里渊谱存在的非局部效应，文献[18]采用实测具有非局部效应的布里渊谱训练来得到改进的神经网络，采用基于洛伦兹模型的谱拟合方法、普通神经网络方法和文中提出的改进神经网络方法，针对实测具有非局部效应的光纤布里渊谱的计算进行了验证。总体而言，现有文献在针对普通光纤上取得了不错的准确性[16-18]。但是现有的应用多针对光纤轴上的裸光纤，而且研究多侧重于该方法是否具有可用性。架空线路上的复合光纤不仅会遭受应变，而且长线路上光纤往往由多段短光纤熔接而成，不同光纤段上的基准布里渊频移不同，神经网络方法是否可以提取架空线路上的复合光纤沿线的布里渊频移以及提取的准确性与谱拟合方法比较如何尚未可知。另外，神经网络的训练样本对布里渊频移的计算结果有较大影响，但未见针对该问题研究的公开文献报道。

为了解决以上问题，本文尝试将一种多层前馈神经网络应用于光纤复合架空线路布里渊频移的提取，编程实现了多层前馈神经网络方法和基于洛伦兹模型的谱拟合方法，并将它们用于某 22 km OPGW 沿线应变的提取中，将两种方法的计算结果从不同角度进行了系统比较，验证了神经网络方法在光纤复合架空线路沿线应变提取的有效性以及相较于常规的谱拟合方法与神经网络方法的优势。

1　光纤复合架空线路沿线应变测量方法

架空线路中复合的光纤除了用于通信，还可用于传感。基于布里渊散射的分布式光纤传感的基本原理是利用耦合器将脉冲光射入光纤，光在光纤前向传播中不停发生散射，背向散射光达到入射端被光电检测器检测，得到频移与光功率的关系即为布里渊谱。目前，常认为布里渊谱近似满足洛伦兹模型[19]，如式(1)所示：

$$g_{\mathrm{B}}(\nu)=g_0\frac{(\Delta\nu_{\mathrm{B}}/2)^2}{(\nu-\nu_{\mathrm{B}})^2+(\Delta\nu_{\mathrm{B}}/2)^2} \tag{1}$$

式中，g_{B} 为布里渊增益，ν 为频移，g_0 为增益的峰值，$\Delta\nu_{\mathrm{B}}$ 为线宽，ν_{B} 为布里渊频移。布里渊频移与光纤的物性参数满足式(2)[20]：

$$\nu_{\mathrm{B}}=\frac{2n}{\lambda_{\mathrm{p}}}\sqrt{\frac{(1-\kappa)E}{(1+\kappa)(1-2\kappa)\rho}} \tag{2}$$

式中，n 为纤芯折射率，λ_{p} 为光源输出的中心波长，κ 和 E 分别为纤芯的泊松比和杨氏模量，ρ 为纤芯密度。

考虑到 n，κ，E 和 ρ 与应变的关系，同时考虑到架空线路沿线的温度变化不大，如果认为线路沿线的温度为 T_0，则布里渊频移近似地与应变满足式(3)所示的线性关系：

$$\nu_{\mathrm{B}}(\varepsilon,z)=\nu_{\mathrm{B}}(T_0,0)(1+C_\nu^\varepsilon\varepsilon(z)) \tag{3}$$

式中，ε 为应变，z 为光纤轴向位置，$\nu_{\mathrm{B}}(T_0,0)$ 表示基准温度 T_0 和无应变下光纤的布里渊频移，C_ν^ε 为

基于布里渊频移的应变敏感系数，针对不同光纤该值会略有不同，本文选择针对架空线路复合光纤的典型值 0.05 MHz/με。根据测得的 ν_B，结合式(3)即可获得光纤的应变。

因此，监测架空线路沿线光纤应变的关键是计算布里渊频移，可用谱拟合方法计算布里渊频移。假设布里渊谱满足洛伦兹模型时，基于最小二乘谱拟合方法的目标函数如式(4)所示：

$$E_T = \sum_{k=1}^{K} (g_B(\nu_k) - g_{Bk})^2 \tag{4}$$

式中，E_T 为增益误差的平方和，K 为布里渊谱的扫频点数，ν_k 为第 k 个扫频点，g_{Bk} 为 ν_k 对应的布里渊增益测量值。

采用适合于最小二乘拟合的优化算法优化 g_0，ν_B 和 $\Delta\nu_B$，使目标函数趋于最小化，则即可获得布里渊频移，根据式(3)即可计算光纤沿线中的应变。

2 神经网络方法

本文实现的人工神经网络为多层前馈人工神经网络[21]，其结构如图 1 所示。

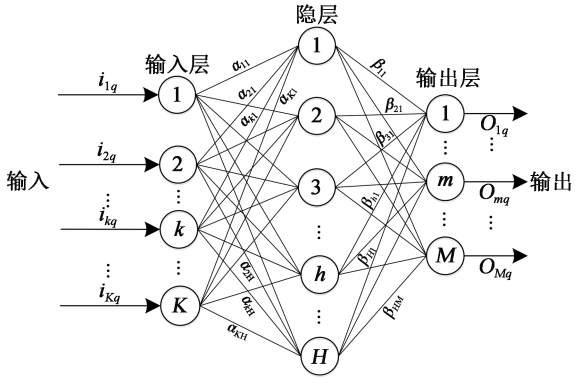


图 1 多层前馈神经网络结构

以上神经网络输入与输出的关系如式(5)所示：

$$O_{mq} = \varphi_2\left[\sum_{h=1}^{H}\beta_{hm}\varphi_1\left(\sum_{k=1}^{K}\alpha_{kh}i_{kq} + \theta_{1h}\right) + \theta_{2m}\right],\quad 1 \leqslant m \leqslant M \tag{5}$$

式中，O_{mq} 为针对第 q 个训练样本输出层第 m 个神经元的输出，$\boldsymbol{I}_q = [i_{1q}, i_{2q}, \cdots, i_{kq}, \cdots, i_{Kq}]$ 为第 q 个训练样本，φ_1 和 φ_2 分别为隐层和输出层神经元的激活函数，α_{kh} 为输入层第 k 个神经元到隐层第 h 个神经元的激活函数，β_{hm} 为隐层第 h 个神经元到输出层第 m 个神经元的激活函数，θ_h 和 θ_m 分别为隐层第 h 个神经元和输出层第 m 个神经元的阈值，K，H 和 M 分别为输入层、隐层和输出层的神经元数量。从数学角度来看，多层前馈神经网络实现了从输入到输出的一种映射，只要隐层神经元数量足够，多层前馈神经网络理论上可以实现任意复杂的映射。因此，神经网络方法有望有效提取光纤沿线的布里渊频移。具体应用时神经网络的输入为各个扫频点的增益，输出为布里渊频移，这样输入层神经元数量与扫频点数一致，输出层仅有一个神经元。假设针对第 q 个样本 $\boldsymbol{I}_q$，对应神经网络期望的输出数组 $\boldsymbol{T}_q = [t_{1q}, \cdots, t_{mq}, \cdots, t_{Mq}]$，则采用均方误差形式的目标函数，如式(6)所示：

$$E = \frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}\left(\sum_{m=1}^{M}\left\{\varphi_2\left[\sum_{h=1}^{H}\beta_{hm}\varphi_1\left(\sum_{k=1}^{K}\alpha_{kh}i_{kq} + \theta_{1h}\right) + \theta_{2m}\right] - t_{mq}\right\}^2\right) \tag{6}$$

神经网络的训练是典型的最小二乘拟合问题。通过相关算法优化权值矩阵和阈值矩阵可以实现目标函数的最小化。一旦训练完成，神经网络无需继续执行耗时的训练过程，即可针对实测光纤沿线的布里渊谱提取布里渊频移。

3 实验验证与分析

实验采用某商业化 BOTDR 实测了某高压线路 22 km 的 OPGW 复合光纤沿线的布里渊谱。布里渊谱测量参数如下：入射脉冲光宽度为 10 ns，扫频范围为 10.70～10.95 GHz，扫频间隔为 1 MHz，叠加平均次数为 2^{14}，采样分辨率为 0.5 m。采用 Matlab 编程实现了谱拟合方法和神经网络方法。对实测谱采用基于洛伦兹模型的谱拟合方法得到光纤沿线的布里渊频移，如图 2 所示。

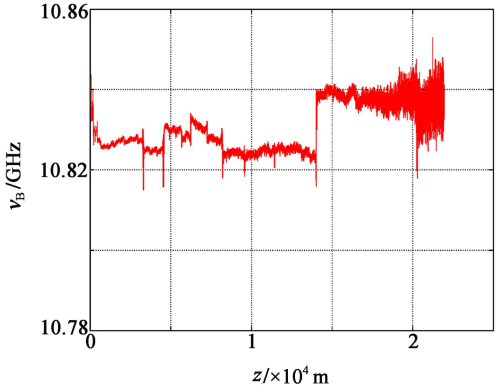


图 2 基于洛伦兹模型的谱拟合方法得到光纤沿线的布里渊频移

由图 2 可知，22 km 长光纤上的布里渊频移呈现出分段特性，这可能是由于 OPGW 上的光纤为

多段光纤熔接而成，而不同段光纤的基准布里渊频移不同。

谱拟合方法得到的布里渊频移在 10.796～10.858 GHz 范围内变化，光纤沿线线宽的均值为 14.17 MHz。综合以上信息，用于神经网络训练的布里渊谱（训练样本）采用式(1)数值产生，具体参数如下：$g_0=1$，$\Delta\nu_B=14.17$ MHz，扫频范围为 10.70～10.95 GHz，扫频间隔为 1 MHz，信噪比分别设置为 5，10，15，20，30 和 40 dB，同一信噪比下产生 10 个布里渊谱用于训练；布里渊频移在 10.785～10.865 GHz 范围内线性变化，步长为 1 MHz。神经网络输入层和输出层的神经元数量分别为 251 和 1，隐层神经元数量设置为 10，隐层和输出层神经元的激活函数为线性函数，神经网络的训练算法为 Levenberg-Marquardt 算法，最多迭代次数设置为 1 000，为了使神经网络尽量学习到样本中隐藏的规则，训练目标（布里渊频移的均方误差）设置为 0.01 MHz^2。为了获得初始权值和阈值存在的随机性对神经网络的影响，针对相同的网络结构、参数和训练样本，在不同初始权值和阈值下训练得到了 100 个神经网络。为了提高分析结果的说服力，随机选择了第 1，33，67 和 100 个神经网络，其训练误差与迭代次数的关系如图 3 所示。

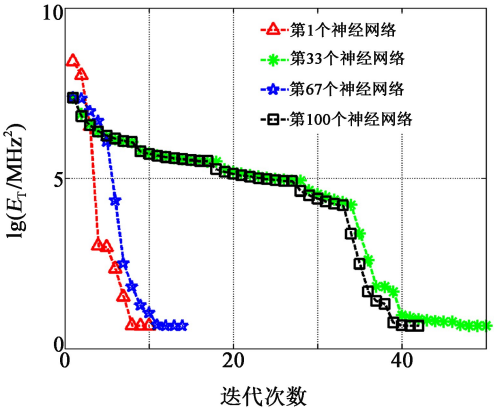
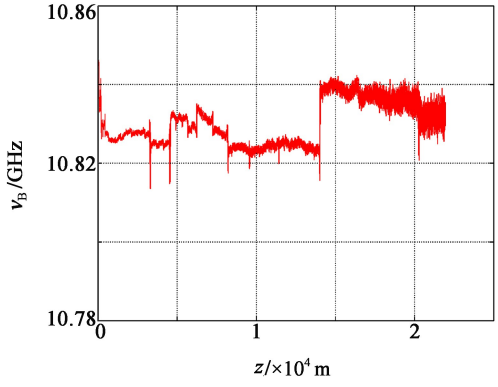


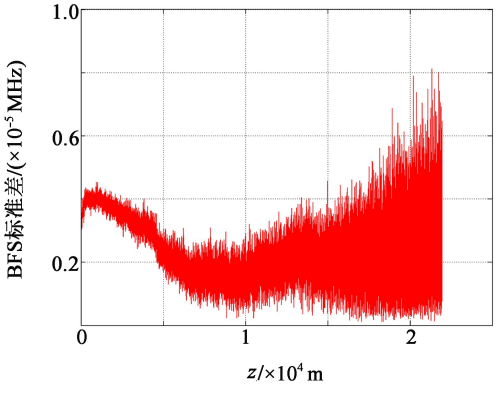
图 3　神经网络误差与迭代次数的关系

以上神经网络经过迭代后均收敛，误差 E_T 均为 4.69 MHz^2，而基于洛伦兹模型的谱拟合方法对应误差为 4.96 MHz^2，即神经网络的误差略小。这体现了多层前馈神经网络优异的学习能力。另外，不仅是这 4 个神经网络，100 个不同初始权值和阈值的神经网络训练完成后误差几乎相等，这大致能说明不同情况下神经网络均成功收敛于最小值点，没有陷入局部极小值点。

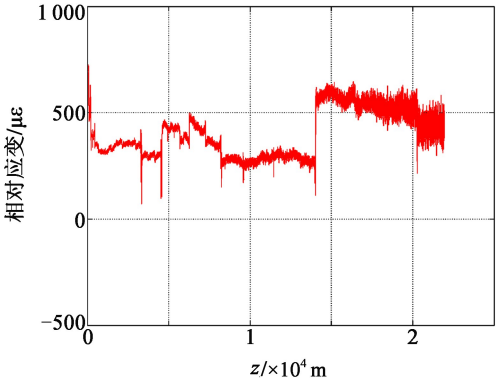
采用训练完成的神经网络（第 1 个）针对测试样本得到光纤沿线的布里渊频移，如图 4(a)所示。从定性规律上看，神经网络方法的提取结果与谱拟合方法的提取结果非常相近。另外图 4(b)给出了 100 个神经网络计算结果的标准差，可见标准差非常小，不同神经网络结果具有很高的稳定性。以上结果在一定角度上验证了神经网络方法的可靠性。由于在敷设之前没有获得复合光纤在不同温度下的基准布里渊频移 $\nu_B(T_0,0)$，综合考虑后假设测量温度下该光纤的基准布里渊频移为 10.81 GHz，此时由式(3)算得的应变本文中称为相对应变，光纤沿线相对应



（a）　布里渊频移



（b）　布里渊频移的标准差



（c）　相对应变

图 4　神经网络方法得到光纤沿线的布里渊频移和相对应变

变如图 4(c)所示。注意,虽然该相对应变与真实的应变存在某一固定的差距,但如此处理并不影响对神经网络方法有效性的分析。

下面从定量角度进行分析。基于洛伦兹模型的谱拟合方法和神经网络方法提取得到光纤沿线的布里渊频移之差如图 5 所示。由图 5 可知,在光纤前 15 km 范围内两种方法的布里渊频移之差基本小于 2 MHz,在光纤尾端随着信噪比的减小,两种方法计算结果的差距变大,最大差距超过了 15 MHz。下面探究造成差距的原因及两种方法的可靠性。图 6 展示了图5“o”位置处的实测布里渊谱、洛伦兹模型

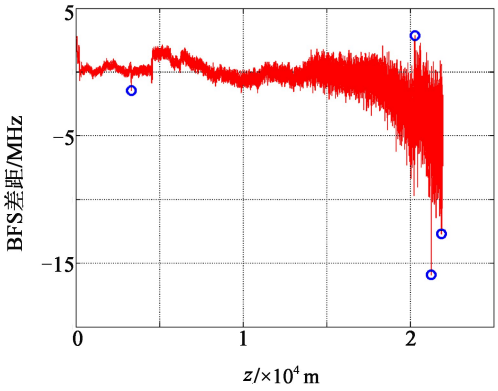
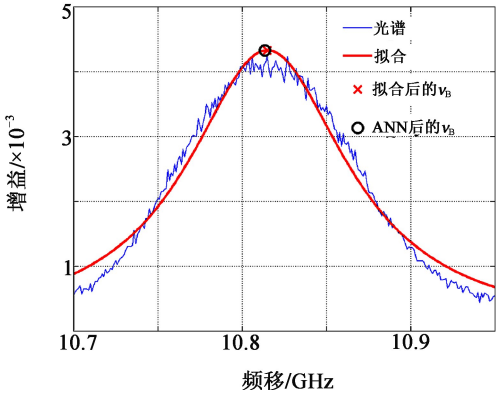
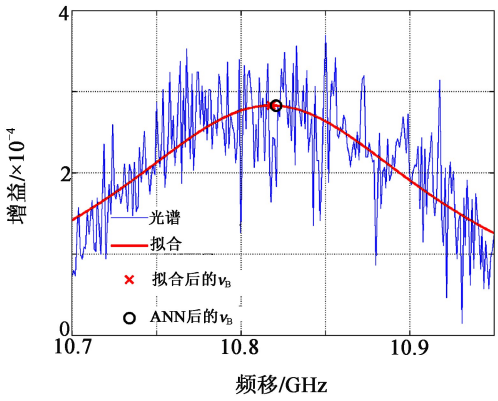


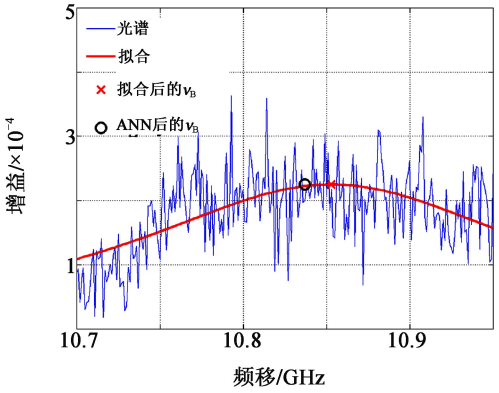
图 5 两种方法得到光纤沿线布里渊频移的差距



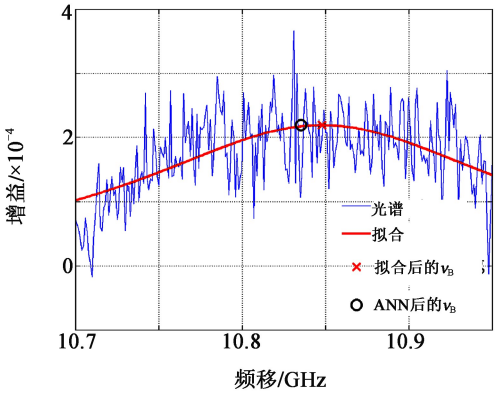
(a) D_ν = −1.45 MHz



(b) D_ν = 2.85 MHz



(c) D_ν = −15.90 MHz



(d) D_ν = −12.68 MHz

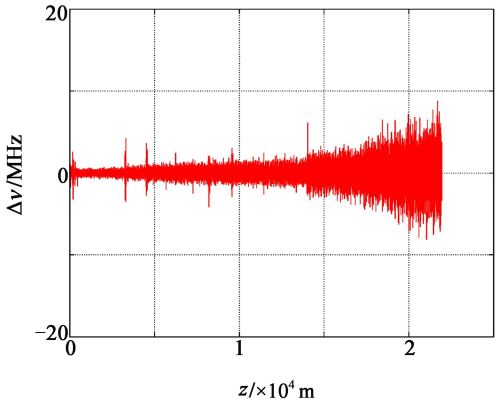
图 6 谱拟合方法和神经网络方法的计算结果

拟合结果及神经网络的计算结果。其中,图中 D_ν 为两种方法算得的布里渊频移之差。

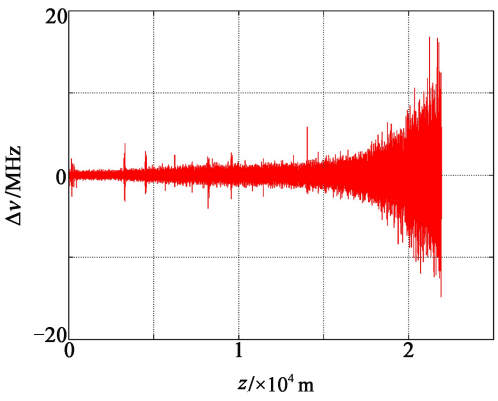
图 6 结果与图 5 基本吻合,也是信噪比越小两种方法的计算结果差距越小。图 6(c)和(d)中两种算法的计算结果差距分别达到了 −15.90 和 −12.68 MHz,已经较大,但很难确定哪种方法准确度更高。可以理解为噪声对布里渊频移提取结果有影响,尤其在信噪比较低时影响较大,正如噪声本身存在随机性一样,噪声对不同算法提取到布里渊频移的影响也存在随机性。也就是说此时两种算法都有显著误差,两种算法提取得到布里渊频移的差距会更大。

下面从另外一个角度分析两种方法计算结果的可靠性,给出两种方法算得光纤沿线的布里渊频移针对前后两点的差距,如图 7 所示。注意,图中的 $\Delta\nu$ 即为前后两个相邻点布里渊频移之差。由图 7 可知,对于谱拟合方法,前后两点布里渊频移差距的最大值和均值分别为 19.18 和 0.73 MHz,大于 10 MHz 的点有 44 个;对于神经网络方法,前后两点布里渊频移差距的最大值和均值分别为 16.69 和

0.66 MHz，大于 10 MHz 的点仅有 3 个。考虑到入射光脉宽为 10 ns，而采样分辨率仅为 0.5 m（虽然采样分辨率小于空间分辨率，但这并不影响本文分析结果的可靠性），前后两个测量点的布里渊频移应该比较接近，二者的差距很大程度是由噪声及对算法的影响导致。显然，神经网络方法提取得到光纤沿线前后两点的布里渊频移差距比谱拟合方法对应结果更小，这可能是因为基于洛伦兹模型的谱拟合方法对参数初值要求较高，当信噪比过低时，初值难以更准确地获得，这增加了该方法的不稳定性。以上结果从一定角度验证了神经网络方法具有更高的可靠性。



（a）　谱拟合方法



（b）　神经网络方法

图 7　两种算法算得布里渊频移的前后两点之差

在处理器为 Intel i7-6700 CPU@3.40 GHz、内存为 16 GB、操作系统为 Windows7 配置下，谱拟合方法和神经网络方法针对一个布里渊谱计算一次布里渊频移所需时间的平均值分别为 43.32 ms 和 2.01 μs，显然神经网络方法的计算时间仅为谱拟合方法的 1/20 000 左右。随着光纤沿线待测谱测量数量的增加，布里渊频移的提取时间逐渐增大，采用神经网络方法显然非常有助于提高复合光缆沿线应变测量的实时性。

综上所述，在光纤复合智能架空线路沿线应变的提取中，神经网络方法具有与谱拟合方法相似的准确性，甚至在低信噪比时其可靠性略高于前者，同时其计算时间远小于前者。

4　结论

本文对光纤复合架空线路应变测量问题进行了研究，提出将人工神经网络方法应用于光纤沿线应变的测量，将两种方法的计算结果从不同角度进行了系统比较。结果表明，神经网络方法能有效获得光纤沿线的布里渊频移，具有与谱拟合方法相似的准确性，其可靠性甚至在低信噪比时略高于后者，同时计算时间远小于谱拟合方法，仅约为后者的 1/20 000。

参考文献：

[1] 孙梦晨，丛　伟，余　江，等. 电网运维大数据背景下的继电保护通信系统故障定位方法[J]. 电力自动化设备，2019，39(4)：141-147.
Sun Mengchen，Cong Wei，Yu Jiang，et al. Fault locating method based on big data of power grid operation and maintenance for relay protection communication system[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39(4)：141-147.

[2] 蔡　菠，谈　浩，李　彦，等. 一种线路保护复用通道故障自诊断机制[J]. 电力工程技术，2017，36(6)：73-77.
Cai Bo，Tan Hao，Li Yan，et al. A fault self-diagnosis mechanism for multiplexing optical channels of relay protection[J]. Electric Power Engineering Technol.，2017，36(6)：73-77.

[3] 吴劲松，黄　琦，吴钟博，等. 光纤复合架空相线的工程应用研究[J]. 中国电力，2013，46(10)：106-110.
Wu Jinsong，Huang Qi，Wu Zhongbo，et al. Study on applications of optical phase conductors (OPPCs) in engineering[J]. Electric Power，2013，46(10)：106-110.

[4] 蒋海明，朱胜华，刘　媛，等. OPGW 接入变电站构架规范化问题的研究与实践[J]. 电力系统通信，2013，34(1)：26-29.
Jiang Haiming，Zhu Shenghua，Liu Yuan，et al. Research and implementation on standardization of OPGW access substation architecture[J]. Telecommunications for Electric Power System，2013，34(1)：26-29.

[5] 梁芝贤，张晓东，魏明海. 电力通信光缆运行维护及外力破坏防范措施[J]. 电力系统通信，2011，32(6)：67-72.
Liang Zhixian，Zhang Xiaodong，Wei Minghai. Power communication cable maintenance and external damage prevention measures[J]. Telecommunications for Electric Power System，2011，32(6)：67-72.

[6] 孙晋茹，焦梓家，朱　鑫，等. 光纤复合架空地线雷电损伤模

式及影响因素的实验及仿真研究[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1872-1880.
Sun Jinru，Jiao Zijia，Zhu Xin，et al. Experimental and simulation study of damage mode and influencing factors of lightning damage to optical fiber ground wires under lightning impulse and continuous current[J]. High Voltage Engineering，2021，47(5)：1872-1880.

[7] 赵晗祺，连伟华，吴 斌，等. 风振对OPGW偏振态和通信的影响[J]. 光通信技术，2021，45(3)：58-62.
Zhao Hanqi，Lian Weihua，Wu Bin，et al. Effect of wind vibration on polarization of OPGW and communication[J]. Optical Communication Technology，2021，45(3)：58-62.

[8] 杨 坤，郝蕴琦，叶 青，等. 基于BOTDR传感技术的架空光缆覆冰监测研究[J]. 激光杂志，2018，39(8)：43-45.
Yang Kun，Hao Yunqi，Ye Qing，et al. Ice-coating monitoring research on aerial cables with BOTDR sensing system[J]. Laser J.，2018，39(8)：43-45.

[9] 董永星，武怡帆，芮晓明，等. 分裂导线不同步脱冰动力响应研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版)，2018，45(1)：86-91，100.
Dong Yongxing，Wu Yifan，Rui Xiaoming，et al. Research on dynamic response of bundled conductor after non-synchronous ice shedding[J]. J. of North China Electric Power University (Natural Science Edition)，2018，45(1)：86-91，100.

[10] 章李烽，李晓华，赵文彬. 光纤复合架空地线温度场仿真计算[J]. 中国电力，2019，52(10)：100-107.
Zhang Lifeng，Li Xiaohua，Zhao Wenbin. Simulation analysis of temperature field of optical fiber composite overhead ground wire[J]. Electric Power，2019，52(10)：100-107.

[11] 叶 青，潘政清，王照勇，等. 相位敏感光时域反射仪研究和应用进展[J]. 中国激光，2017，44(6)：7-20.
Ye Qing，Pan Zhengqing，Wang Zhaoyong，et al. Progress of research and applications of phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. Chinese J. of Lasers，2017，44(6)：7-20.

[12] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics[M]. New York：Academic Press，2001.

[13] Xu Zhiniu，Zhao Lijuan，Qin Hua. Selection of spectrum model in estimation of Brillouin frequency shift for distributed optical fiber sensor[J]. Optik，2019，199：163355.

[14] Zhang Yanjun，Li Da，Fu Xinghu，et al. An improved Levenberg-Marquardt algorithm for extracting the features of Brillouin scattering spectrum[J]. Measurement Science & Technology，2013，24(1)：015204.

[15] 徐志钮，樊明月，赵丽娟，等. 二次多项式拟合在分布式光纤传感中的应用[J]. 半导体光电，2020，41(3)：322-329.
Xu Zhiniu，Fan Mingyue，Zhao Lijuan，et al. Application of the quadratic polynomial fitting in distributed optical fiber sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(3)：322-329.

[16] Ruiz-Lombera R，Fuentes A，Rodriguez-Cobo L，et al. Simultaneous temperature and strain discrimination in a conventional BOTDA via artificial neural networks[J]. J. of Lightwave Technology，2018，36(11)：2114-2121.

[17] Li Y，Wang J. Optimized neural network for temperature extraction from Brillouin scattering spectra[J]. Optical Fiber Technology，2020，58：102314.

[18] Lu C，Liang Y，Jia X，et al. Artificial neural network for accurate retrieval of fiber Brillouin frequency shift with non-local effects[J]. IEEE Sensors J.，2020，20(15)：8559-8569.

[19] 吕健刚，韦春桃. 基于BOTDA布里渊背向散射光谱数据的拟合算法[J]. 光学技术，2015，41(4)：380-384.
Lü Jian'gang，Wei Chuntao. Fitting algorithm for BOTDA Brillouin back scattered-light spectrum data[J]. Optical Technique，2015，41(4)：380-384.

[20] 白 清. BOTDR系统性能提升关键技术研究[D]. 太原：太原理工大学，2021.
Bai Qing. Research on key technologies for performance enhancement of BOTDR system[D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2021.

[21] 蒋宗礼. 人工神经网络导论[M]. 北京：高等教育出版社，2001.
Jiang Zongli. Introduction to Artificial Neural Networks[M]. Beijing：Higher Education Press，2001.

作者简介：

叶明武(1990—)，男，硕士，工程师，研究方向为通信运行；

赵丽娟(1981—)，女，博士，副教授，主要研究方向为光纤传感与光纤通信。