

引用本文: 莫巧灵. 基于 Lorentzian 模型与伪 Voigt 模型的谱拟合算法的准确性比较[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 46–50.

基于 Lorentzian 模型与伪 Voigt 模型的谱拟合算法的准确性比较

莫巧灵

(广西安全工程职业技术学院 电子与信息安全系, 南宁 530100)

摘要: 为了比较基于 Lorentzian 模型与伪 Voigt 模型的 2 种谱拟合算法的准确性, 基于布里渊散射的分布式光纤传感原理, 首先比较了实测布里渊谱的 Lorentzian 模型和伪 Voigt 模型的计算结果, 然后通过伪 Voigt 模型数值生成了具有不同形状和信噪比的布里渊谱, 并分别采用基于 Lorentzian 模型与伪 Voigt 模型的谱拟合算法计算了布里渊频移。最后, 对这 2 种算法的准确性进行了比较。仿真结果表明, 在不同布里渊谱形状和信噪比条件下, 基于 Lorentzian 模型与伪 Voigt 模型的谱拟合算法的计算准确性相近, 但前者的计算量小于后者。

关键词: 布里渊谱; 布里渊频移; 分布式光纤传感; Lorentzian 模型; 伪 Voigt 模型

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)01-0046-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Accuracy comparison of spectrum fitting algorithms based on Lorentzian model and pseudo-Voigt model

MO Qiaoling

(Department of Electronic and Information Security, Guangxi Vocational College of Safety Engineering, Nanning 530100, China)

Abstract: In order to compare the accuracy of two spectrum fitting algorithms based on the Lorentzian model and the pseudo-Voigt model, a distributed optical fiber sensing principle based on Brillouin scattering is used. Firstly, the calculation results of the measured Brillouin spectra using the Lorentzian model and the pseudo-Voigt model are compared. Then, The Brillouin spectrum with different shapes and signal-to-noise ratios is generated numerically through the pseudo-Voigt model, and the Brillouin frequency shift is calculated using spectral fitting methods based on the Lorentzian model and the pseudo-Voigt model, respectively. Finally, the accuracy of these two algorithms is compared. The simulation results show that under different Brillouin spectrum shapes and signal-to-noise ratio conditions, the computational accuracy of the spectrum fitting algorithm based on the Lorentzian model and the pseudo-Voigt model is similar, but the former requires less computation than the latter.

Key words: Brillouin spectrum, Brillouin frequency shift, distributed optical fiber sensing, Lorentzian model, pseudo-Voigt model

0 引言

基于布里渊背向散射的分布式光纤传感技术具有感知光纤承受温度和应变的能力, 以及测量准确性高的优势, 因此该技术被广泛应用于各传感领域^[1-11]。

由于光纤温度和应变与布里渊频移成线性关系, 因此通常采用布里渊频移来同时解调温度和应变。以神经网络^[12-13]为代表的方法虽然能快速计算布里渊频

移, 但抗干扰能力还有待提高。于是, 研究人员一般采用基于模型谱的最小二乘拟合算法来高精度计算布里渊频移。文献[14]研究表明, 布里渊谱符合 Voigt 模型, 但该模型较为复杂, 对拟合算法提出了更高的要求。由于伪 Voigt 模型^[15]与 Voigt 模型相近, 且模型更简单, 软件实现较为容易, 计算实时性更高, 因此基于伪 Voigt 模型的谱拟合算法应用较广泛^[16-17]。除伪 Voigt 模型外, 许多应用中也采用基于 Lorentzian 模型的谱拟合算法计算布里渊频移^[18-21]。然而, 针对不同形状和信噪比的布里渊谱的计算, 没有文献系统地对基于上述 2 种模型的谱拟合算法的准确性进行比较。因此, 本文对基于 Lorentzian 模型与伪 Voigt 模型的谱拟合算法的布里渊频移计算准确性和计算量进行比较。

收稿日期: 2023-07-18。

作者简介: 莫巧灵(1985—), 女, 硕士学历, 副教授, 现就职于广西安全工程职业技术学院电子与信息安全系, 从事教学和科研工作, 主要研究方向为计算机科学技术、信息安全应用技术、通信工程, 主持和参与了 7 项省级、校级相关科研项目 and 教改项目。



1 基于布里渊散射的分布式光纤传感原理

当光纤中的入射光为矩形脉冲光时,测量得到的布里渊谱增益满足如式(1)所示的 Voigt 模型^[14]。

$$g_{B1}(v) = A \frac{2\ln 2}{\pi} \frac{\Delta v_{BL}}{\Delta v_{BG}} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-x^2}}{\left[\sqrt{\ln 2} \frac{\Delta v_{BL}}{\Delta v_{BG}} \right]^2 + \left[2\sqrt{\ln 2} \frac{v-v_B}{\Delta v_{BG}} - x \right]^2} dx \quad (1)$$

其中, $g_{B1}(v)$ 为布里渊增益, v 为频率, v_B 为布里渊频移, Δv_{BL} 和 Δv_{BG} 分别为 Lorentzian 和 Gaussian 谱线的线宽, A 为影响布里渊谱峰的参数, x 为积分公式的中间变量。

由式(1)可知, Voigt 模型计算涉及无限区间上的积分过程, 比较复杂。文献[15-16]提出的伪 Voigt 模型与 Voigt 模型相近, 但计算量要小很多, 因此一般采用伪 Voigt 模型来计算, 其光纤布里渊谱增益表达式为

$$g_{B2}(v) = g_1 \frac{(\Delta v_B/2)^2}{(v-v_B)^2 + (\Delta v_B/2)^2} + g_2 e^{\frac{-(4\ln 2)(v-v_B)^2}{(\Delta v_B)^2}} \quad (2)$$

其中, Δv_B 为线宽, g_1 和 g_2 分别为 Lorentzian 和 Gaussian 模型布里渊增益峰值。

当入射光脉宽不小于 50 ns 时, 实测布里渊谱增益 $g_{B3}(v)$ 近似满足 Lorentzian 模型^[18], 如式(3)所示。

$$g_{B3}(v) = g_0 \frac{(\Delta v_B/2)^2}{(v-v_B)^2 + (\Delta v_B/2)^2} \quad (3)$$

其中, g_0 为布里渊增益峰值。

布里渊频移与光纤的温度、应变成线性关系, 如式(4)所示。

$$v_B = C_v^T T + C_v^\varepsilon \varepsilon + v_{B0} \quad (4)$$

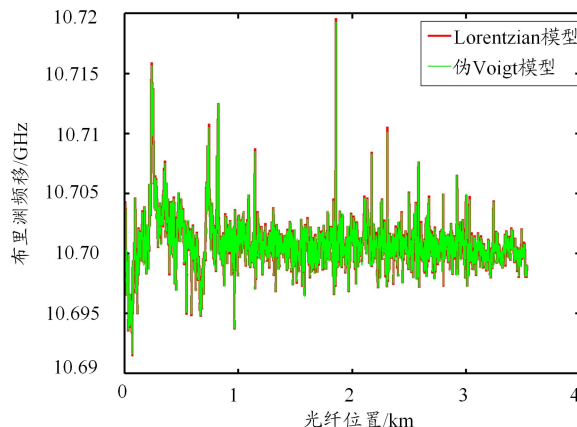
其中, C_v^T 、 C_v^ε 分别为布里渊频移的温度系数和应变系数, v_{B0} 为 0 °C 且无应变时的光纤布里渊频移, T 、 ε 分别为光纤的温度和应变。因此, 根据测量得到的布里渊频移, 结合温度和应变系数, 即可估算光纤的温度或应变。

2 基于 2 种模型的谱拟合算法的准确性比较

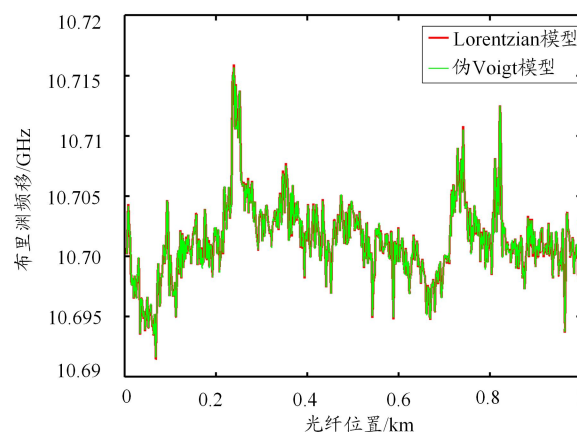
2.1 实测布里渊谱

本文采用某商业化的布里渊散射光时域反射测量计(BOTDR)实测了 G.652.D 型单模光纤沿线的布里渊谱, 光脉冲宽为 20 ns, 叠加平均了 1024 次。针对所有测量得到的布里渊谱, 采用 Lorentzian 模型与伪 Voigt

模型对应的拟合算法分别进行拟合, 得到整根光纤上的布里渊频移如图 1(a)所示。图 1(b)为前 1 km 光纤上的布里渊频移放大图。



(a) 整根光纤上的布里渊频移



(b) 前 1 km 光纤上的布里渊频移放大图

图 1 针对实测布里渊谱 Lorentzian 模型和伪 Voigt 模型的计算结果

由图 1 可知, 基于 2 种模型的谱拟合算法计算得到的布里渊频移非常接近, 计算结果差异的最大值和平均值分别为 0.44 MHz 和 0.08 MHz。

由式(2)和式(3)可知, 基于 Lorentzian 模型和伪 Voigt 模型的 2 种谱拟合算法中待优化变量个数分别为 3 个和 4 个, 而更多的待优化变量往往意味着更大的计算量。为了进一步比较 2 种谱拟合算法的计算量, 在实验参数配置相同 (Windows10 操作系统、16G 内存、i7@3.3GHz 处理器、Matlab2018a 软件) 情况下, 本文采用 2 种谱拟合算法针对实测谱计算布里渊频移的平均时间分别为 86.10 ms 和 111.20 ms。由此可见, 基于 Lorentzian 模型的谱拟合算法计算量小于基于伪 Voigt 模型的谱拟合算法, 且二者计算结果非常相似。因此, 实际应用中一般选择前者。

2.2 仿真布里渊谱

2.2.1 不同形状谱

本文基于伪 Voigt 模型在一根长度为 4 km 的光纤上仿真产生布里渊谱, 每 2 m 对应一个布里渊谱, 布里渊谱峰为 1 a.u.、线宽为 50 MHz、信噪比为 20 dB、扫频范围为 10.6~10.8 GHz、扫频间隔为 2 MHz。式(2)中, g_i 分别取值为 0、0.25、0.5、0.75 和 1, 布里渊频移与光纤位置满足式(5)所示。在距离入射端 2 m 处, 不同 g_i 时的布里渊谱如图 2(a)所示。图 2(b)为 $g_i=0.5$ 时的光纤三维布里渊谱。可以看出, g_i 的大小会影响布里渊谱的形状。

$$v_B(z)=10.7+0.02\sin(\pi z/1\ 000) \tag{5}$$

其中, z 为光纤点与脉冲入射端的距离, 单位为 m; $v_B(z)$ 为位置 z 处的布里渊频移, 单位为 GHz。

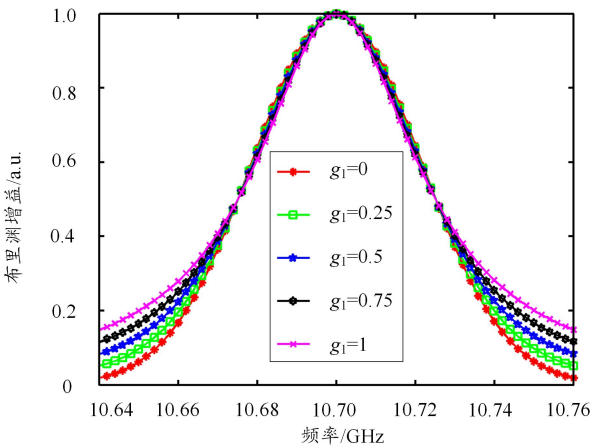
本文采用 2 种谱拟合算法计算出光纤沿线的布里渊频移误差, 统计结果如表 1 所示。可以看出, 2 种

谱拟合算法计算出的光纤沿线的布里渊频移误差比较接近, 尤其是当 g_i 取较大值时。这是因为 g_i 越大, 布里渊谱越接近于 Lorentzian 谱线, 此时 Lorentzian 模型与伪 Voigt 模型都可以有效表征布里渊谱, 二者误差就越接近; 反之, 误差差别就越大。不同形状谱(不同 g_i 值)时, 2 种谱拟合算法的平均误差之差最大值为 0.10 MHz, 最大误差之差最大值为 0.41 MHz, 对应实际情况中导致温度的差距约为 0.10 °C 和 0.41 °C, 应变差距约为 2.0 $\mu\varepsilon$ 和 8.2 $\mu\varepsilon$ 。

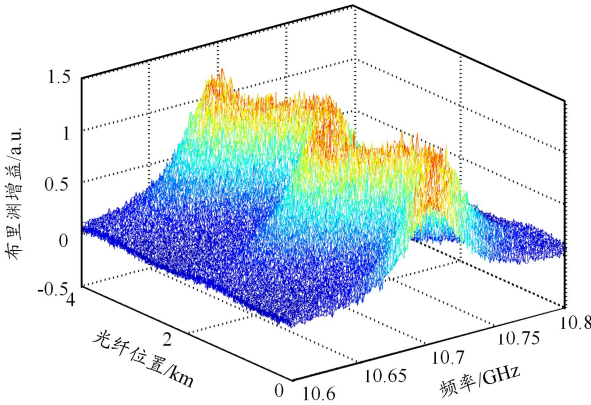
2.2.2 不同信噪比

布里渊谱的信噪比分别设置为 5、15、25、35 dB, 式(3)中 g_i 取值为 0.5, 其它参数与 2.2.1 节一致。2 种谱拟合算法计算出的光纤沿线布里渊频移误差统计结果如表 2 所示。不同信噪比时, 距离入射端 2 m 处含噪布里渊谱及拟合结果如图 3 所示。

由表 2 可知, 不同信噪比时, 2 种谱拟合算法计算



(a) 不同 g_i 时的布里渊谱



(b) $g_i=0.5$ 时的三维布里渊谱

图 2 数值产生的光纤沿线布里渊谱

表 1 布里渊谱的形状不同时, 采用 2 种算法计算出布里渊频移误差的统计结果

模型	平均误差/MHz					最大误差/MHz				
	$g_i=0$	$g_i=0.25$	$g_i=0.5$	$g_i=0.75$	$g_i=1$	$g_i=0$	$g_i=0.25$	$g_i=0.5$	$g_i=0.75$	$g_i=1$
Lorentzian	0.51	0.5	0.5	0.5	0.51	2.14	1.83	2.14	2.64	2.02
伪 Voigt	0.41	0.43	0.45	0.48	0.51	1.73	1.61	1.78	2.49	2.02

表 2 布里渊谱的信噪比不同时, 采用 2 种算法计算出布里渊频移误差的统计结果

模型	平均误差/MHz				最大误差/MHz			
	S=5 dB	S=15 dB	S=25 dB	S=35 dB	S=5 dB	S=15 dB	S=25 dB	S=35 dB
Lorentzian	2.88	0.89	0.27	0.09	13.55	3.38	1.19	0.36
伪 Voigt	2.74	0.81	0.25	0.08	13.45	3.12	1.06	0.33

注: S 为信噪比。

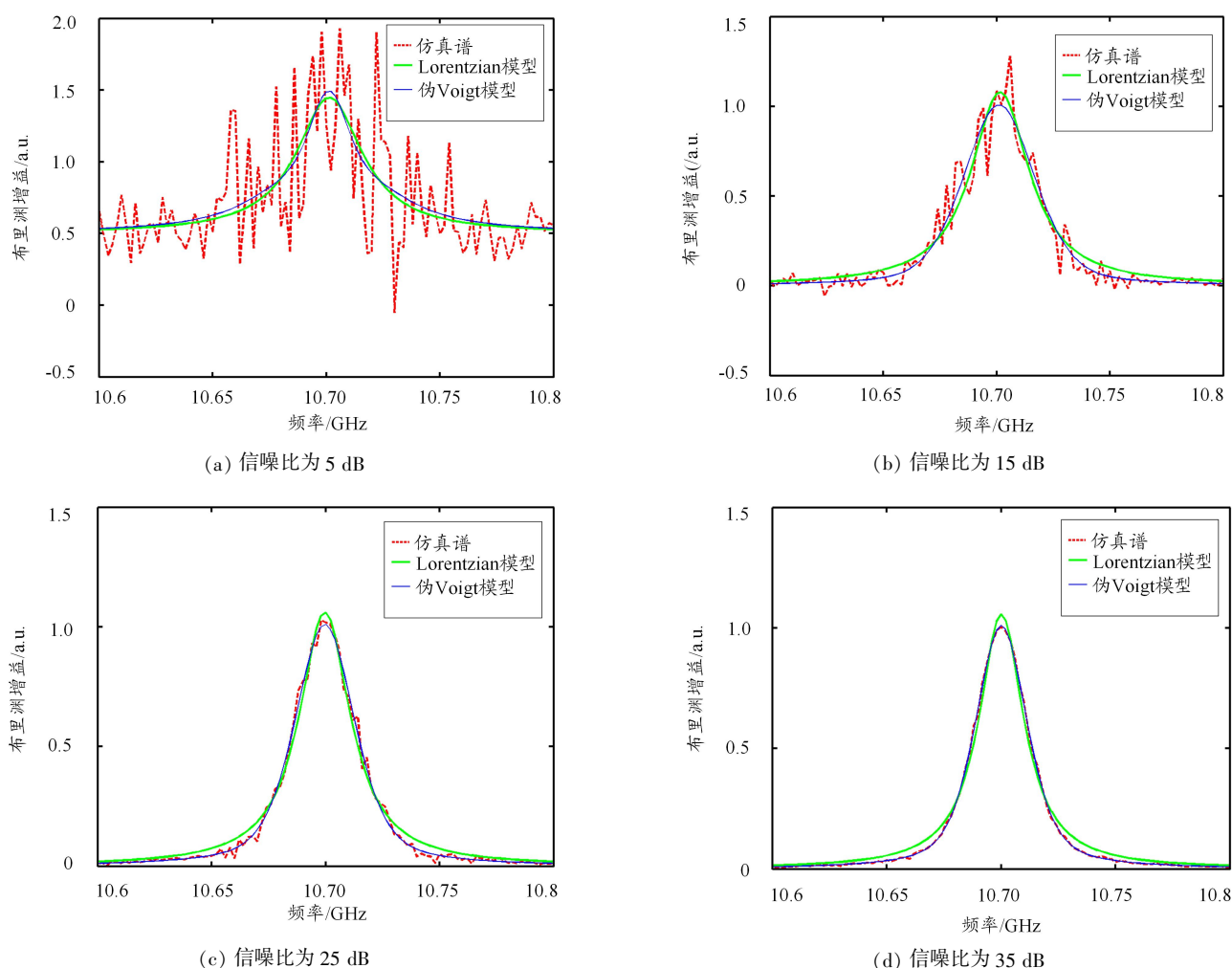


图3 针对不同信噪比布里渊谱时2种算法的拟合结果

出的布里渊频移误差相近, 平均误差之差最大值为 0.14 MHz, 最大误差之差最大值为 0.26 MHz, 这 2 个差值对应实际的温度差距分别约为 0.14 °C 和 0.26 °C, 应变差距分别约为 2.8 $\mu\epsilon$ 和 5.2 $\mu\epsilon$ 。由图 3 可知, 在高信噪比时无论是 Lorentzian 模型还是伪 Voigt 模型, 拟合得到的波形均逼近仿真谱。

3 结束语

本文采用实测和仿真布里渊谱比较了基于 Lorentzian 模型与伪 Voigt 模型的谱拟合算法的准确性和计算速度。仿真结果表明: 基于 Lorentzian 模型与伪 Voigt 模型的谱拟合算法计算准确性相近, 但前者计算量更小, 在实际应用中建议选择前者。

参考文献:

[1] MOTIL A, BERGMAN A, TUR M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 81–103.

- [2] CHENG L, MAO H, PAN P, et al. Experimental verification research of pipeline deflection deformation monitoring method based on distributed optical fiber measured strain [J]. Measurement, 2022, 199: 111483–111483–12.
- [3] 谭明享, 张东生. 基于频域反射的分布式光纤传感变形重构研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(12): 17–20.
- [4] 侯公羽, 胡志宇, 李子祥, 等. 分布式光纤及光纤光栅传感技术在煤矿安全监测中的应用现状及展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(S1): 96–110.
- [5] 绪向首, 王大鹏. 基于光频域反射技术的拱桥模型应变分布试验研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(9): 20–23.
- [6] MARAVAL D, GABET R, JAOUEN Y, et al. Dynamic optical fiber sensing with Brillouin optical time domain reflectometry: application to pipeline vibration monitoring [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3296–3302.
- [7] MINARDO A, PORCARO G, GIANNETTA D, et al. Real-time monitoring of railway traffic using slope-assisted Brillouin distributed sensors [J]. Applied Optics, 2013, 52(16): 3770–3776.
- [8] BAO X, CHEN L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors [J]. Sensors, 2011, 11(4): 4152–4187.
- [9] XU Z N, HU Z W, ZHAO L J, et al. Application of temperature field modeling in monitoring of optic-electric composite submarine cable with

莫巧灵: 基于 Lorentzian 模型与伪 Voigt 模型的谱拟合算法的准确性比较

insulation degradation [J]. Measurement, 2019, 133: 479–494.

[10] HAO Y, LIU N, KUN Y, et al. Online ice-coating monitoring research on overhead transmission lines with Brillouin optical time domain reflectometry [J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60: 102339-1–102339-5.

[11] HORIGUCHI T, SHIMIZU K, KURASHIMA T, et al. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1296–1302.

[12] SUN X, HONG X, WANG S, et al. Frequency shift estimation technique near the hotspot in BOTDA sensor [J]. Optics Express, 2019, 27(9): 12899–12913.

[13] WANG B, LIANG W, NAN G, et al. Deep neural networks assisted BOTDA for simultaneous temperature and strain measurement with enhanced accuracy [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2530–2543.

[14] KWON H, KIM S, YEOM S, et al. Analysis of nonlinear fitting methods for distributed measurement of temperature and strain over 36 km optical fiber based on spontaneous Brillouin backscattering [J]. Optics Communications, 2013, 294: 59–63.

[15] MA Y, LI H, GU Z, et al. Analysis of Rayleigh-Brillouin spectral profiles and Brillouin shifts in nitrogen gas and air-pseudo-Voigt [J]. Optics Express, 2014, 22(2): 2092–2104.

[16] ZHANG Y, YU C, FU X, et al. An improved Newton algorithm based on finite element analysis for extracting the Brillouin scattering spectrum features [J]. Measurement, 2014, 51: 310–314.

[17] BAO X, BROWN A, DEMERCHANT M, et al. Characterization of the Brillouin-loss spectrum of single-mode fibers by use of very short (<10-ns) pulses [J]. Optics Letters, 1999, 24(8): 510–512.

[18] NARUSE H, TATEDA M, OHNO H, et al. Dependence of the Brillouin gain spectrum on linear strain distribution for optical time-domain reflectometer-type strain sensors [J]. Applied Optics, 2002, 41 (34): 7212–7217.

[19] XU Z N, HU Z W, ZHAO L J, et al. Optimal frequency scanning range for parameters extraction from Brillouin scattering spectrum [J]. Optik, 2018, 158: 1380–1393.

[20] PANNELL C N, DHIWAYO J, WEBB D J. The accuracy of parameter estimation from noisy data, with application to resonance peak estimation in distributed Brillouin sensing [J]. Measurement Science and Technology, 1998, 9(1): 50–57.

[21] XU Z N, ZHAO L J. Accurate and ultra-fast estimation of Brillouin frequency shift for distributed fiber sensors [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 303: 111822-1–111822-6.