光电技术及应用

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260408003

布里渊散射分布式光纤传感系统误差估算方法

徐志钮，曾诚淋，赵丽娟*，陈永辉，晁明哲，李　茜
（华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003）

摘　要： 为了估算分布式光纤传感中的误差，提出了混合矩算法计算布里渊频移时的误差估算方法。首先，介绍了混合矩算法，并将其与洛伦兹、高斯、伪Voigt拟合算法进行了比较，验证了混合矩算法的可靠性。其次，基于仿真和实测布里渊谱，研究了信噪比、线宽、扫频范围和扫频点数对混合矩算法算得布里渊频移误差的影响。结果表明，随着信噪比的增加，布里渊频移误差呈指数规律下降。在扫频点数不变且扫频范围与线宽的比值保持不变的情况下，随着线宽的增加，布里渊频移误差呈正比增大。在扫频点数保持不变的情况下，随着扫频范围的增加，布里渊频移误差近似线性增大。在扫描范围保持不变的情况下，布里渊频移误差随扫频点数的增加而呈现幂规律减小。最后，根据上述结果得出了考虑布里渊谱信噪比、扫频范围、线宽和扫频点数下的布里渊频移误差公式。实测了大量不同脉宽下的布里渊谱，并根据所提公式的计算，得出相对误差为0.31%～12.73%，均值为4.65%；误差绝对值的均值为0.33 MHz。

关键词： 分布式光纤传感；混合矩；布里渊频移误差；估算方法；影响因素
中图分类号： TN247　　**文章编号：** 1001－5868(2026)05－0968－07

Error Estimation Methods in Brillouin Scattering-Based Distributed Optical Fiber Sensing

XU Zhiniu, ZENG Chenglin, ZHAO Lijuan, CHEN Yonghui, CHAO Mingzhe, LI Xi
(**School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN**)

Abstract: To estimate the error in calculating the Brillouin frequency shift (BFS) for distributed fiber optic sensing, the mixed moment algorithm is proposed. First, mixed moment is introduced and compared with the Lorentz, Gaussian, and pseudo-Voigt fitting algorithms to validate its reliability. Subsequently, the impacts of signal-to-noise ratio (SNR), linewidth, frequency sweep range, and number of sweeps on BFS errors calculated by mixed moment are systematically investigated through simulated and measured Brillouin spectra. The results indicate that BFS errors decrease exponentially with increasing SNR. When the number of sweeps remains constant and the ratio of frequency sweep range to linewidth is fixed, BFS errors increase proportionally with expanding linewidth. With a fixed number of sweeps, BFS errors exhibit a near-linear upward trend as the frequency sweep range increases. When the sweep range is fixed, BFS errors decrease, following a power-law relationship with increasing sampling points. Finally, a BFS error formula incorporating Brillouin spectral SNR, sweep range, linewidth, and sampling points is derived based on the above results. Experimental measurements of Brillouin spectra under various pulse widths demonstrate that the relative estimation error of the proposed formula ranges from 0.31% to 12.73%, with mean absolute errors of 0.33 MHz.

收稿日期：2026－04－08.
基金项目：国家自然科学基金项目(62171185, 62273146)；河北省中央引导地方科技专项项目(264Z2101G).
* **通信作者：**赵丽娟

Key words：distributed optical fiber sensing；mixed moment；Brillouin frequency shift errors；estimation method；influencing factors

0　引言

长管道、输电线路、大型桥梁等大型结构体不仅具有较高的经济价值，而且关系着居民的生产生活，其长期稳定运行是保障公共安全的重要基础。因此，需对上述大型结构体进行定期检查和维护，从而预防事故的发生。这些结构体的缺陷常表现为温度和应变的异常，而基于布里渊散射的光纤分布式传感[1-4]可以有效探测光纤温度和应变的变化。该传感器不仅具有电绝缘、空间占用小、抗电磁干扰能力强、安全系数高、耐腐蚀性强、操控简单等优点，还可利用单根光纤可实现对整个大型结构体的检测，其在科学研究和工程实践中具有广泛应用[5-7]。

在布里渊散射光纤分布式传感中，布里渊频移（Brillouin Frequency Shift，BFS）与温度、应变之间呈线性关系[8-9]，常用其解调温度或应变。通过拟合法和互相关算法[10-13]等对布里渊频移进行估算，主流的拟合模型为高斯拟合[14]、洛伦兹[15]、伪Voigt[16]和Voigt[17]模型。对于线路末端，尤其是长线路，布里渊谱信噪比低，测量误差大。解调得到温度或应变后，需要评估其测量准确性；一旦温度或应变系数确定，其测量的准确性便取决于BFS计算的准确性。由此，BFS误差的估算已成为该领域的研究热点。1995年，Horiguchi等提出一种布里渊频移误差估算公式，但该公式中没有给出扫频点数和扫频范围对其的影响规律[18]。2013年，Soto等提出一个基于二次多项式拟合算法（Quadratic Polynomial Fitting，QPFA）提取布里渊频移误差估计的新公式[19]。2016年，Yu等对该公式进行优化，使用蒙特卡罗方法系统地研究了Q因子、信噪比和频率扫描间隔的影响[20]。2020年，有研究报道利用洛伦兹算法计算布里渊频移，并获得布里渊频移误差计算公式[21]。此前，对于布里渊频移的计算一般采用洛伦兹算法、互相关算法等。2022年，有研究提出以混合矩算法对布里渊频移进行计算，该方法在减少计算时间的同时保持了计算精确性，并且对初始值、曲线拟合方式及函数上下限的设置不敏感，因而展现出良好的应用前景[22]。但目前尚未有研究利用混合矩所得布里渊频移的误差估计公式。

为了解决该问题，本文在验证混合矩算法有效性的基础上，基于伪Voigt模型仿真产生了大量的布里渊谱；用混合矩算法计算布里渊频移，研究获得了信噪比、扫频范围、线宽和扫频点数对布里渊频移误差的影响规律，提出了考虑以上因素下的布里渊频移误差估算公式；通过实测大量不同脉宽、扫频范围下布里渊谱的计算验证了公式的可靠性。利用此公式可有效估算基于布里渊散射的光纤温度或应变测量误差。

1　混合矩算法

1.1　基于混合矩的BFS计算方法

测得的布里渊谱可以近似看作伪Voigt模型，故常利用伪Voigt模型数值产生布里渊谱，其表达式为：

$$g_{\mathrm{B}}(v)=g_{01}\frac{(\Delta v_{\mathrm{B}}/2)^2}{(v-v_{\mathrm{B}})^2+(\Delta v_{\mathrm{B}}/2)^2}+g_{02}e\frac{-4\ln 2(v-v_{\mathrm{B}})^2}{(\Delta v_{\mathrm{B}})^2} \tag{1}$$

式中，g_{01}为洛伦兹分量的谱峰，g_{02}为高斯谱分量的谱峰，Δv_{B}为线宽；v_{B}为布里渊频移，g_{B}为布里渊增益，v为频率。

使用混合矩来计算布里渊频移，设X_i和Y_i分别表示第i个频率和对应的布里渊增益，$i=1,2,\cdots,n$，n为扫频点数，则基于混合矩[22]可由式（2）获得BFS。

$$v'_{\mathrm{B}}=\sum_{i=1}^{n}(X_iY_i^{\,2})/\sum_{i=1}^{n}(Y_i^{\,2}) \tag{2}$$

式中，v'_{B}表示混合矩计算得到的布里渊频移。

1.2　混合矩算法与其他算法的比较

利用伪Voigt模型生成布里渊谱，设置v_{B}=10.8 GHz，Δv_{B}=30 Hz，g_{01}=0.9，g_{02}=0.9，在10.77～10.83 GHz范围内扫频，扫频间隔为1 MHz，扫频点数为61。为了模拟真实情况，再将零均值高斯白噪声添加到生成的布里渊频谱中。为了抑制噪声随机性对研究结果的影响，每个信噪比下重复生成1 000个以上含噪声的布里渊谱。生成的布里渊频谱信号的信噪比（Signal-to-noise ratio，SNR）在5～40 dB范围内变化，步长为5 dB，信噪比由式（3）得到。计算平台为Matlab 2020b，

CPU 为 Intel（R）Core（TM）i7-10 750H CPU@ 2.60 GHz 2.59 GHz，内存为海力士16 GB，DDR4。

$$R_{SN}=10\times\log_{10}(P_S/P_N) \tag{3}$$

式中，R_{SN}为信噪比，单位为dB，P_S为信号的功率，P_N为噪声的功率。

采用混合矩、洛伦兹、高斯拟合和伪Voigt拟合算法对仿真生成的布里渊谱进行处理，并据此提取布里渊频移。各方法所得频移估计结果的平均绝对误差如图1所示。同时记录了这4种算法的计算时间，结果如表1所示，其中T_{max}，T_{min}，T_{mean}和T_{std}分别为计算耗时的最大值、最小值、均值和标准差。

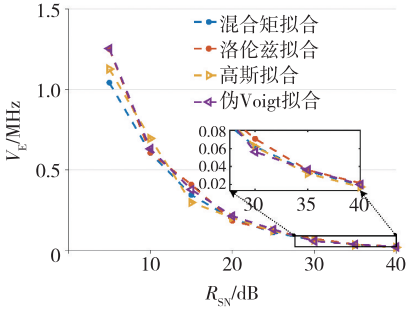


图1 4种算法估计布里渊频移的误差随信噪比的变化

由图1可知，在低信噪比的情况下混合矩算法更优于其余3种算法，在高信噪比下4种算法算的布里渊频移误差比较接近。洛伦兹拟合算法被认为具有较高的准确性和抗干扰能力，而混合矩准确性与其相似，因此后者也具有较高的准确性。

表1 4种算法计算时间的统计结果

算法	T_{max}/s	T_{min}/s	T_{mean}/s	T_{std}/s
洛伦兹	3.63×10^{-1}	3.21×10^{-1}	3.35×10^{-1}	1.27×10^{-2}
高斯	1.47×10^{-1}	1.41×10^{-1}	1.44×10^{-1}	1.59×10^{-1}
混合矩	4.21×10^{-5}	3.80×10^{-5}	3.93×10^{-5}	1.10×10^{-6}
伪Voigt	8.28×10^{-2}	8.05×10^{-2}	8.18×10^{-2}	6.40×10^{-2}

由表1可知，混合矩算法的计算时间远少于洛伦兹、高斯、伪Voigt拟合算法的计算时间，仅分别为洛伦兹算法、高斯拟合算法和伪Voigt拟合算法的1/8 524，1/3 664和1/2 081。综上所述，混合矩算法可以在较高精度的前提下快速计算布里渊频移。

2 影响因素研究

由于布里渊频移与温度和应变满足线性关系，布里渊频移误差与温度、应变误差满足线性关系，通过估计布里渊频移误差即可估计温度、应变误差。在利用混合矩计算的过程中，信噪比、扫频范围、线宽、扫频点数的变化会影响布里渊谱的噪声水平和数据量，从而影响布里渊频移误差。因此，本文选择这4个影响因素进行研究。

2.1 信噪比

设置v_B=10.8 GHz，Δv_B=30 MHz，g_{01}=0.9，g_{02}=0.9，在10.77～10.83 GHz范围内扫频，扫频间隔为1 MHz，扫频点数为61。为了模拟真实情况，再将零均值高斯白噪声添加到生成的布里渊频谱中。每个信噪比下重复生成了10 000个含噪声的布里渊谱，并将基于式（2）获得10 000个布里渊频移的误差绝对值取平均值，用V_E表示。本文设置信噪比的范围为10～40 dB，步长为5 dB。不同信噪比下的布里渊频移计算误差及对应的拟合结果如图2所示。

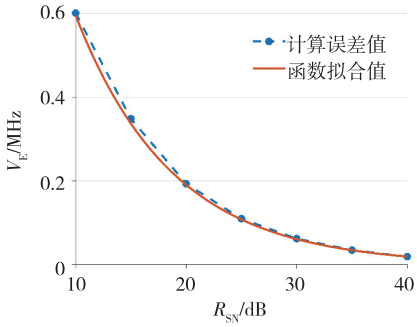


图2 布里渊频移的误差随信噪比变化及其拟合结果

由图2可知，随着信噪比的增加，布里渊频移误差呈近似指数规律下降。拟合误差幅值的最大值和均值仅分别为4.78×10^{-3} MHz和2.37×10^{-3} MHz，拟合相对误差幅值的均值仅为1.17%。

设V_E的单位为MHz，R_{SN}的单位为dB；通过拟合得到误差与信噪比关系如式（4）所示。

$$V_E=1.91e^{-0.11R_{SN}} \tag{4}$$

信号在光纤中传输时，存在固有的传输损耗，强度随距离呈指数级下降。随着测量长度的增加，信噪比下降，由式（4）可知，其会导致布里渊频移误差相应增大。

2.2 扫频范围

信噪比设置为10 dB；扫频范围设为$v_B-R\Delta v_B/2$～$v_B+R\Delta v_B/2$，其中R=2，3，…，10。由于温度或应变的作用，光纤上布里渊频移会变化，过窄的扫频范围会降低布里渊频移提取的稳定性，因此本文中的最小扫频范围设置为线宽的两倍，即R=2。不同R值时扫频点数保持不变，其余设置与2.1节相

同，不同扫频范围下的布里渊频移计算误差及对应的拟合结果如图 3 所示。

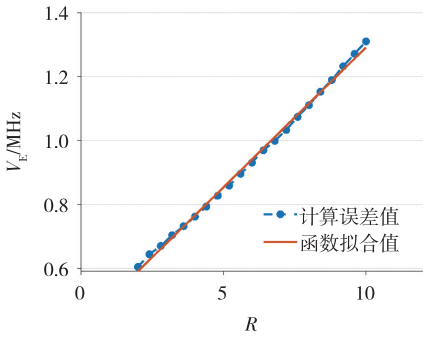


图 3　布里渊频移误差随扫频范围的变化及其拟合结果

由图 3 可知，当扫频点数保持不变时，随着扫频范围的增加，布里渊频移误差呈现稳定上升趋势，其规律接近线性。拟合误差幅值的最大值和均值仅分别为 1.68×10^{-2} MHz 和 6.11×10^{-3} MHz，拟合相对误差幅值的均值仅为 0.65%。拟合得到误差与扫描范围关系如式(5)所示。

$$V_E=-9.36\times10^{-3}\ln R^{10.63}+1.07\times10^{-1}R+4.71\times10^{-1} \tag{5}$$

2.3　线宽

信噪比设置为 10 dB；线宽的范围为 30～150 MHz，步长为 10 MHz。线宽变化时，扫频范围、线宽比值、扫频点数均保持不变，其余设置与 2.1 节相同。不同线宽下的布里渊频移计算误差及对应的拟合结果如图 4 所示。

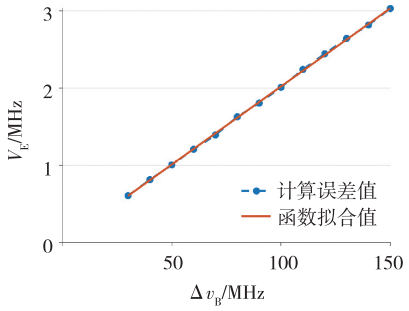


图 4　布里渊频移误差随线宽的变化及其拟合结果

由图 4 可知，随着线宽的增加，布里渊频移误差呈线性上升。拟合误差幅值的最大值和均值仅分别为 3.61×10^{-2} MHz 和 1.24×10^{-2} MHz，拟合相对误差幅值的均值仅为 0.78%。拟合得到误差与线宽关系如式(6)所示。

$$V_E=2.02\times10^{-2}\Delta v_B \tag{6}$$

测量过程中，光纤长度的变化会引起线宽的相应变化：光纤长度增加，线宽扩大，从而导致布里渊频移误差的增大。

2.4　扫频点数

信噪比设置为 10 dB，扫频点数的范围为 11～1 201，步长为 10。扫描范围保持不变，其余设置与 2.1 节相同。不同扫频点数下的布里渊频移计算误差及对应的拟合结果如图 5 所示。

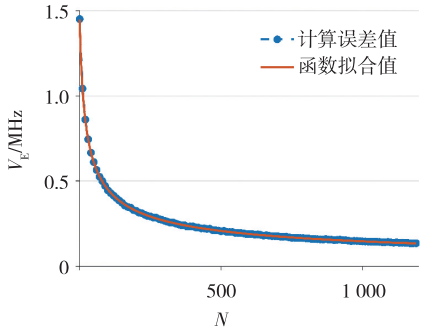


图 5　布里渊频移误差随扫频点数的变化及其拟合结果

由图 5 可知，布里渊频移误差随扫频点数的增加而幂规律减小。拟合误差幅值的最大值和均值仅分别为 1.10×10^{-2} MHz 和 1.53×10^{-3} MHz，拟合相对误差幅值的均值仅为 0.67%。拟合得到误差与扫频点数的关系如式(7)所示，式中 N 为扫频点数。

$$V_E=4.8N^{-5.04\times10^{-1}} \tag{7}$$

3　BFS 误差估算公式的提出及验证

3.1　BFS 误差估算公式

为了获得考虑信噪比、扫频范围、线宽和扫频点数下布里渊频移误差的估算公式，本文结合式(4)～(7)，得到最终的布里渊频移误差公式如式(8)所示。

$$V_E=\alpha(\beta_1\ln R^{\beta_2}+\beta_3R+\beta_4)\mathrm{e}^{\sigma SNR}N^{\rho}\Delta v_B \tag{8}$$

为了确定式(8)的准确性及 α，β_1，β_2，β_3，β_4，σ 和 ρ 的取值，本文获得了大量不同参数下的布里渊谱，根据不同情况下计算布里渊频移误差，拟合获取以上参数。布里渊谱参数如下：信噪比的范围为 0～40 dB，步长为 5 dB；线宽的范围为 30～150 MHz，步长为 10 MHz；扫频点数的范围为 11～1 201，步长为 10；R 的范围为 2～16，步长为 1；扫频范围设置为 $v_B-R\Delta v_B/2$～$v_B+R\Delta v_B/2$。每种参数组合下重复生成了 1 000 个含噪声的布里渊谱，并将基于式(2)获得布里渊频移的误差绝对值取均值，其余设置与 2.1 节相同。参数 α，β_1，β_2，β_3，β_4，σ，ρ 通过最小二乘法获得并适当微调，共计得到了 163 800 个 V_E 数据。

具体的拟合结果如图6所示(图中的布里渊频移误差已按降序排列)。

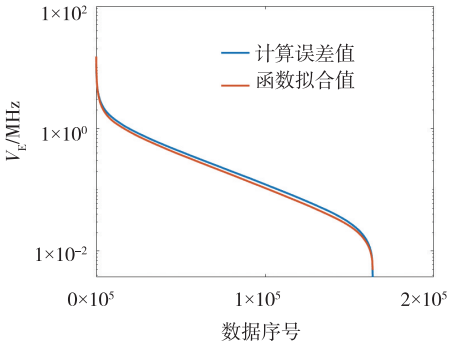


图6 布里渊频移误差计算值及其拟合结果

拟合误差幅值的最大值和均值分别为4.83 MHz和0.06 MHz,拟合相对误差幅值的均值为10.39%。所以最终得到布里渊频移误差的估算公式如式(9)所示。

$$V_E = 0.319(0.05\ln R^{10.61} + 0.13R + 0.79)\times e^{-0.1SNR} N^{-0.56}\Delta v_B \quad (9)$$

同时,扫描次数与频率步长如式(10)所示。

$$N = R\Delta v_B/\delta + 1 \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)之后,可得式(11)。

$$V_E = 0.319(0.05\ln R^{10.61} + 0.13R + 0.79)\times e^{-0.1SNR}(R\Delta v_B/\delta + 1)^{-0.56}\Delta v_B \quad (11)$$

综上所述,在多数情况下,可以使用上述误差估算公式对布里渊频移误差进行估算。由于式(9)与式(11)所得到的结果均相同,下文仅给出由式(9)所得的估计误差。

3.2 实验验证

为了验证所提出的布里渊频移误差估计公式,利用图7所示的BOTDR传感系统实测了单模光纤(型号:G.657A2)的布里渊谱。光脉冲宽度分别为5,10,20,50和100 ns,对应的线宽分别为154.87,99.04,59.41,42.65和40.92 MHz,对应的信噪比分别为13.27,17.22,17.94,21.10和22.34 dB。叠加平均次数分别设置为2^{10}和2^{18},扫频间隔为1 MHz,扫频点数为401,扫频范围为10.52~10.92 GHz。

考虑到叠加平均次数为2^{18}时,叠加平均次数很高,从而得到较高的布里渊谱信噪比,故本文将此时的布里渊光谱假定为没有噪声干扰的布里渊光谱,则可以获得叠加平均次数为2^{10}时的布里渊光谱信噪比。考虑到最小二乘拟合法具有较高的准确性,故采用该方法获得叠加平均次数为2^{18}布里渊谱对应的布里渊频移。另外,叠加平均次数为2^{18}时的室温与2^{10}时的室温略有差距,所以修正了由温度变化带来的误差。利用混合矩算法算得平均次数为2^{10}的布里渊频移,与修正后且叠加平均次数为2^{18}的布里渊频移相减,即可获得叠加平均次数为2^{10}时的布里渊频移误差,同时利用式(9)也计算布里渊频移误差。100 ns下,扫描范围为401 MHz时的布里渊频移及其误差值如图8所示。不同光脉冲宽度下,实际误差和公式算得的误差随扫频范围的变化如图9所示。

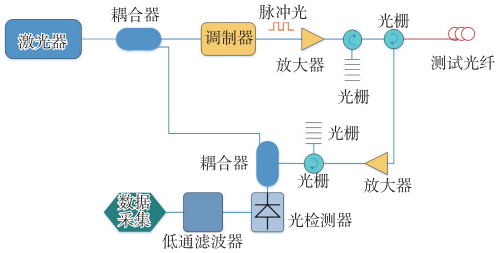


图7 BOTDR传感系统

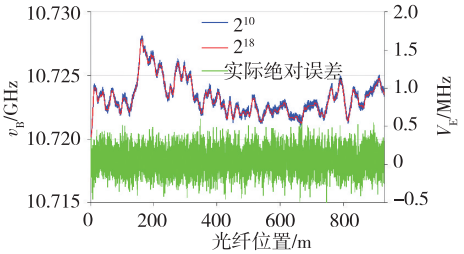


图8 100 ns下,扫描范围为401 MHz时的布里渊频移及其误差

在5 ns和10 ns的情况下布里渊谱的线宽比较大,若选择的扫频范围过小,则会导致扫频范围小于一个线宽,与实际情况不符,所以图9(a)和(b)中没有给出扫频范围过小的情况下的相对误差值。由图9可知,不同脉宽之下,针对式(9)所计算得到的布里渊频移的误差,100 ns时相对误差幅值的最大和最小值分别为12.73%和0.60%。50 ns时相对误差幅值的最大和最小值分别为6.76%和0.72%。20 ns时相对误差幅值的最大和最小值分别为6.80%和0.32%。10 ns时相对误差幅值的最大和最小值分别为12.48%和3.07%。5 ns时相对误差幅值的最大和最小值分别为4.49%和0.31%。以上情况下相对误差幅值在0.31%~12.73%范围内变化,均值为4.65%;误差绝对值的均值为0.33 MHz。因此,本文提出的布里渊频移误差估算公式在不同情况下能较为准确地估算布里渊频移误差。

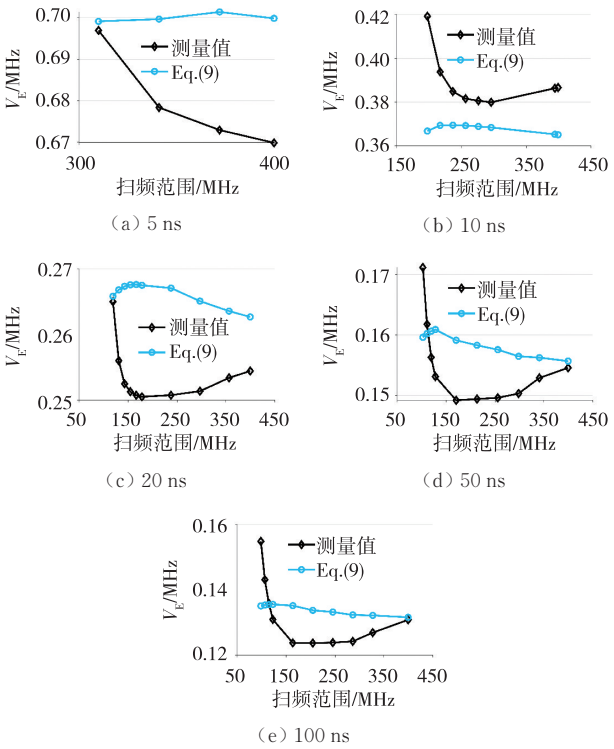


图 9　不同光脉冲宽度下，实际误差和公式算得误差随扫频范围的变化

4　结论

本文在验证混合矩算法有效性的基础上研究了基于该算法的布里渊频移计算误差的影响因素及估算公式。主要结论如下：

（1）混合矩算法与洛伦兹、高斯、伪 Voigt 拟合算法准确性相近，但计算时间仅为洛伦兹算法的 1/8 524，高斯拟合算法的 1/3 664，伪 Voigt 拟合算法的 1/2 081。

（2）信噪比、扫频范围、线宽和扫频点数对布里渊频移误差有显著影响，单一影响因素的影响如下：随着信噪比的增加，布里渊频移误差呈指数规律下降。在扫频点数保持不变的情况下，随着线宽的增加，布里渊频移误差呈线性增大。在扫频点数保持不变的情况下，随着扫频范围的增加，布里渊频移误差近似线性增大。在扫描范围保持不变的情况下，随着扫频点数的增加，布里渊频移误差随扫频点数的幂函数减小。

（3）BFS 误差估计公式如下：

$$V_E = 0.319\left(0.05\ln R^{10.61} + 0.13R + 0.79\right) e^{-0.1SNR} N^{-0.56} \Delta v_B$$

针对实测不同光脉宽、扫频范围的布里渊谱，使用上式所得布里渊频移的相对误差幅值在 0.31%～12.73% 范围内变化，均值为 4.65%；误差绝对值的均值为 0.33 MHz。

参考文献：

[1] 耿豪键，张立欣，张　磊，等. 基于片式封装微纳光纤的布里渊散射特性研究[J]. 半导体光电，2025，46(1)：43-48.
Geng Haojian，Zhang Lixin，Zhang Lei，et al. Brillouin scattering characteristics of chip-sscale packaged micro/nano fibers [J]. Semiconductor Optoelectronics，2025，46 (1)：43-48.

[2] 王成亮，官国飞，徐　妍，等. 基于布里渊散射光纤传感技术的温度和应变同时测量误差分析[J]. 光通信技术，2021，45(11)：11-17.
Wang Chengliang，Guan Guofei，Xu Yan，et al. Error analysis of simultaneous measurement of temperature and strain based on Brillouin scattering optical fiber sensing technology [J]. Optical Communication Technology，2021，45(11)：11-17.

[3] Tang Y，Zhu M，Pang F，et al. Distributed optical fiber magnetic field sensor based on polarization-sensitive OFDR [J]. Optics Express，2024，32(7)：11726.

[4] Li Y，Zeng X，Shi Y. A spatial and temporal signal fusion based intelligent event recognition method for buried fiber distributed sensing system [J]. Optics & Laser Technology，2023，166：109658.

[5] 高浩然，刘鑫煜，李拥政，等. 基于BFS波动计算的BOTDR微弱频移位置识别方法[J]. 光学学报(网络版)，2025，2(15)：72-81.
Gao Haoran，Liu Xinyu，Li Yongzheng，et al. BOTDR weak frequency shift position identification method based on BFS fluctuation calculation[J]. Acta Optica Sinica (Online)，2025，2(15)：72-81.

[6] 赵航航，张明红，范　敏，等. 分布式光纤多参数融合传感系统研究[J]. 半导体光电，2024，45(6)：1024-1030.
Zhao Hanghang，Zhang Minghong，Fan Min，et al. Research on distributed fiber optic multi-parameter fusion sensing system [J]. Semiconductor Optoelectronics，2024，45 (6)：1024-1030.

[7] 董乃臻，陈　俊，陶礼兵，等. 基于分布式光纤协同感知的线路弧垂监测方法研究[J/OL]. 光通信技术，2025，1-11. https://link. cnki. net/urlid/45. 1160. TN. 20251010. 1440. 006
Dong Nai Zhen，Chen Jun，Tao Libing，et al. Research on conductor sag monitoring method based on distributed fiber optic cooperative sensing [J/OL]. Optical Communication Technology，2025，1-11. https://link. cnki. net/urlid/45. 1160. TN. 20251010. 1440. 006

[8] 李永倩，王少康，华子明，等. 布里渊温度和压力传感器增敏设计[J]. 半导体光电，2021，42(5)：624-629.
Li Yongqian，Wang Shaokang，Hua Ziming，et al.

Sensitization design of Brillouin temperature and pressure sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(5): 624-629.

[9] Sánchez L A, Díez A, Cruz J L, et al. Strain and temperature measurement discrimination with forward Brillouin scattering in optical fibers[J]. Optics Express, 2022, 30(9): 14384-14392.

[10] Farahani M A, Castillo-Guerra E, Colpitts B G. Accurate estimation of Brillouin frequency shift in Brillouin optical time domain analysis sensors using cross correlation [J]. Optics Letters, 2011, 36(21): 4275-4277.

[11] Farahani M A, Castillo-Guerra E, Colpitts B G. A detailed evaluation of the correlation-based method used for estimation of the Brillouin frequency shift in BOTDA sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(12): 4589-4598.

[12] Hong X, Zhang X, Sun X, et al. A fast method for Brillouin frequency shift estimation [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 284: 6-11.

[13] Abbasnejad M, Alizadeh B. FPGA-based implementation of a novel method for estimating the Brillouin frequency shift in BOTDA and BOTDR sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(5): 2015-2022.

[14] Gong J M, Ding Z, Li S P, et al. Multi-pumped tellurite-based Raman fiber amplifier based on Gaussian fitting of gain spectrum [J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(6): 245.

[15] Pannell C N, Dhliwayo 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] Soto M A, Thévenaz L. Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors [J]. Optics Express, 2013, 21(25): 31347-31366.

[20] Yu Y, Luo L, Li B, et al. Frequency resolution quantification of Brillouin-distributed optical fiber sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(21): 2367-2370.

[21] Xu Z, Zhao L. Estimation of error in Brillouin frequency shift in distributed fiber sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(4): 1829-1837.

[22] Zhao L, Chen Y. A superfast Brillouin frequency shift estimation method based on the mixed moment for the distributed optical fiber sensor[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 70: 102856.

作者简介：

徐志钮(1979—)，男，博士，教授，主要从事分布式光纤传感及在电气设备状态监测和故障诊断中的应用研究；

赵丽娟(1981—)，女，博士，教授，主要从事光纤传感与光纤通信的研究。