

基于相似匹配方法的光纤布里渊频移提取准确性 影响因素分析

赵丽娟¹, 王贺晴¹, 徐志钮^{2*}, 车小霞¹

¹华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003;

²华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003

摘要 基于相似匹配方法的布里渊频移提取算法具有无需预设模型、适应性强的优点。为了获得谱信号参数和扫频参数对算法性能的影响,在仅单一因素变化情况下系统研究了布里渊线宽(简称线宽)、信噪比、扫频间隔、扫频范围对布里渊频移提取准确性的影响规律。结果表明:频移误差与线宽成线性关系,探测谱与参考谱线宽差距本身对算法准确性产生的影响较小;频移误差随参考谱和探测谱信噪比的增加均呈指数规律减小;扫频间隔不变时随参考谱扫频范围增加频移误差存在增加的趋势,同时计算时间线性增加;探测谱的扫频范围为 2 倍线宽时频移误差最小。研究结果可为布里渊频移的准确提取提供参考。

关键词 光纤光学; 光纤分布式传感; 布里渊散射; 布里渊频移; 相似匹配方法; 影响因素

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0506003

Analysis of Factors Affecting Accuracy of Brillouin Frequency Shift Extraction Based on Similarity Matching

Zhao Lijuan¹, Wang Heqing¹, Xu Zhiniu^{2*}, Che Xiaoxia¹

¹Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University,
Baoding, Hebei 071003, China;

²Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China

Abstract The Brillouin frequency shift extraction algorithm based on similarity matching method exhibits considerable adaptability and does not require a predefined model. In this study, the influence of the Brillouin linewidth (short for linewidth), signal-to-noise ratio, sweeping step, and sweeping range on the extraction accuracy of the frequency shift is systematically studied by varying each factor to obtain the influence of the spectral signals and sweep parameters on the performance of the algorithm. The frequency shift error is a linear function of the Brillouin linewidth. The linewidth difference between the selected detected spectrum and the selected reference spectrum does not considerably affect the accuracy of the algorithm. When the signal-to-noise ratio of the selected detected spectrum remains constant, the frequency shift error decreases exponentially with the increasing signal-to-noise ratio of the selected reference spectrum, and vice versa. When the frequency sweep step is maintained constant, the frequency shift error increases with the increasing sweep range of the selected reference spectrum; this is accompanied by a linear increase in the calculation time. The frequency shift error is the smallest when the frequency range of the selected detected spectrum is twice the linewidth. Furthermore, the obtained results can provide a reference for the accurate extraction of Brillouin frequency shift.

Key words fiber optics; distributed fiber sensing; Brillouin scattering; Brillouin frequency shift; similarity matching method; influence factors

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 290.5830

收稿日期: 2019-11-25; 修回日期: 2020-01-10; 录用日期: 2020-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(51607066, 61775057)、河北省自然科学基金(E2019502177)、中央高校基本科研业务费专项资金(2020YJ005, 2019MS090, 2019MS085)

* E-mail: wzcjnx@sohu.com

1 引言

布里渊分布式传感技术能够实现对光纤不同位置处温度和应变信息的测量,具有测量精度高、传感距离长和空间分辨率高等优势,已被广泛应用于光缆、光纤复合海底电缆和大型建筑物等健康状况的在线监测。其主要利用布里渊频移(BFS)与光纤所受的温度和应变之间的线性关系得到相应的温度和应变信息,因此温度和应变的测量精度与布里渊频移的准确性有着密切的关系。

目前,关于布里渊频移提取的主流算法有基于最小二乘拟合的算法和基于模式匹配的算法。前者主要涉及谱模型、优化算法及初值选择方面的研究^[1-4]。肖尚辉等^[1]研究了基于 Levenberg-Marquardt(L-M)算法的布里渊散射谱最优化拟合问题,推导了按照洛伦兹型和高斯型线性加权组合的 pseudo-Voigt 模型;张有迪等^[2]利用小波去噪结合 L-M 算法调节权值后向传输网络,并对布里渊散射谱进行特征提取,提高了系统在低信噪比情况下的拟合精度;郝蕴琦等^[3]研究了洛伦兹曲线拟合自发布里渊散射分段傅里叶变换后每个空间分辨率范围内频域信号的准确性;李晓娟等^[4]研究了多波长布里渊传感系统中的散射谱特性,利用 pseudo-Voigt 函数和 L-M 优化算法对布里渊散射叠加谱进行特征提取。该算法具有较高的准确性^[5],但计算速度偏慢。可以采用优化光路设计^[6-7]、斜坡法^[8-9]或基于线性最小二乘的拟合算法^[10-11]加快谱测量和布里渊频移提取的速度,但线性最小二乘拟合算法对扫频范围关于布里渊频移的对称性要求较高。与以上算法不同,基于模式匹配的算法采用相关性指标来确定布里渊频移,主要包括互相关算法^[12-13]和相似匹配方法^[14],有望抑制扫频范围偏差对布里渊频移提取准确性的影响。Farahani 等^[12]提出了基于互相关卷积的布里渊频移提取方法,对服从洛伦兹分布的有噪信号与理想洛伦兹信号进行卷积运算,得到在峰值附近几乎呈理想洛伦兹分布的信号,改善了信噪比,但其准确度受到扫频数据服从洛伦兹分布的程度的限制。为了进一步提高准确性,尚秋峰等^[13]提出采用高阶矩质心计算来改进基于互相关卷积的布里渊频移提取方法,该算法避免了迭代过程,实时性很好。现有方法多从模型角度出发,期望通过采用更符合布里渊散射谱数据分布的模型使模拟结果更好逼近实测布里渊谱,进而能更加准确地获得布里渊频移。Wang 等^[14]另辟蹊

径,不是从模型角度出发而是根据谱相似性来确定布里渊频移的改变量,进而提出了最大相似匹配方法(SMM),比较受到温度和应变影响前后的布里渊频谱,当相似性达到最高时提取得到对应的频移改变量,该算法的突出优点是频移提取时无需确定谱模型,在布里渊谱较为复杂的情况下也具有很好的适应性。布里渊线宽(简称线宽)、信噪比(SNR)、扫频范围、扫频间隔等参数均对该算法的准确性有影响,但目前没有给出以上参数对该算法影响的报道,这影响了该方法的推广应用。

为了解决该问题,本文在基于相似匹配方法的布里渊频移提取算法的基础上系统研究了线宽、信噪比、扫频范围、扫频间隔对布里渊频移提取准确性的影响规律,本文结果可为分布式光纤传感中布里渊频移的准确提取提供参考。

2 基于相似匹配方法的布里渊频移提取算法

2.1 布里渊谱及参数

考虑到光纤中声波的振幅按 $\exp(t/\tau)$ 衰减,其中 τ 为声子寿命,当脉冲宽度大于 50 ns 时实测布里渊散射谱近似满足洛伦兹模型,如图 1 所示,此时布里渊增益可表示为

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

式中: g_0 为布里渊增益峰值; ν_B 为布里渊频移; $\Delta\nu_B$ 为线宽; ν 为光纤入射光频率。

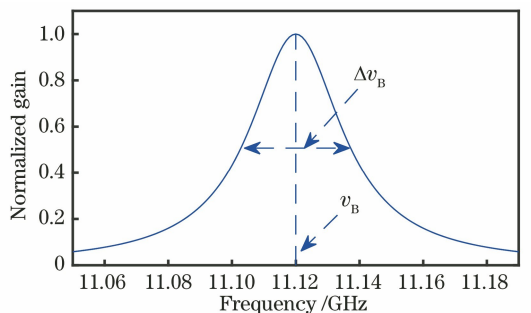


图1 布里渊增益谱

Fig. 1 Brillouin gain spectrum

布里渊频移 ν_B 可表示为

$$\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda_p}, \quad (2)$$

式中: n 为光纤的折射率; V_A 为光纤中的声速; λ_p 为泵浦光波长。若取 $n=1.45$ 、 $V_A=5945$ m/s,对于普通单模光纤,当入射光波长为 1550 nm 时,根据(2)式计算得到的布里渊频移约为 11.12 GHz。

线宽 Δv_B 可表示为^[15]

$$\Delta v_B = \frac{1}{\tau} = 4n^2 \Gamma \frac{v_p^2}{c^2}, \quad (3)$$

式中: c 为光纤中的光速; Γ 为声波阻尼参数; v_p 为泵浦光频率。对于普通单模光纤, 布里渊谱自然线宽约为 35 MHz^[16], 实际测量得到的线宽还会受到入射光脉宽和泵浦功率的影响^[17]。

随着注入传感光纤的调制光脉冲越来越窄, 布里渊谱变得越来越宽, 其形状也逐渐由洛伦兹型向高斯型过渡, 这时的谱可表示为洛伦兹型谱和高斯型谱的线性组合, 并近似满足 pseudo-Voigt 模型^[18], 具体可表示为

$$g_B(v) = g_{01} \frac{(\Delta v_B/2)^2}{(v - v_B)^2 + (\Delta v_B/2)^2} + g_{02} \exp\left[-\frac{4\ln 2(v - v_B)^2}{(\Delta v_B)^2}\right], \quad (4)$$

式中: g_{01} 和 g_{02} 分别表示洛伦兹模型和高斯模型的增益峰值。

当光纤支持传输多个声学模式时, 每个声学模式对应形成一个布里渊峰, 此时的布里渊谱等于每个声学模式对应的布里渊谱的总和^[19]。在一些纤芯经过特殊处理的光纤中, 如光子晶体光纤和大有效面积光纤, 由于是每个布里渊谱的叠加, 总的布里渊谱为展宽的多峰值谱^[20-21]。针对多峰值谱的计算公式较为复杂, 这也给基于模型的布里渊频移提取算法增加了难度。

2.2 相似匹配方法

为减小由布里渊谱的模型选择不合适引起的误差, 相似匹配方法从布里渊谱形状的相似性来考虑^[22], 以相关系数作为相似性的评价标准, 根据温度或应变改变前后布里渊谱的相似性来获得布里渊频移的改变量。该方法的具体实现为分别获得光纤处于自然状态时的散射谱和受到温度或应

变作用后的散射谱, 文中分别称为参考谱 (SRS) 和探测谱 (SDS), 将参考谱的不同部分与探测谱比较, 当获得的相关系数最大时, 得到的频率差即为所求的布里渊频移改变量^[14], 其原理如图 2 所示, 图中 SRS(j) 表示与探测谱进行比较的参考谱的第 j 个部分。其中, 探测谱的扫频范围应包含在参考谱内而且探测谱的扫频间隔应是参考谱的整数倍。

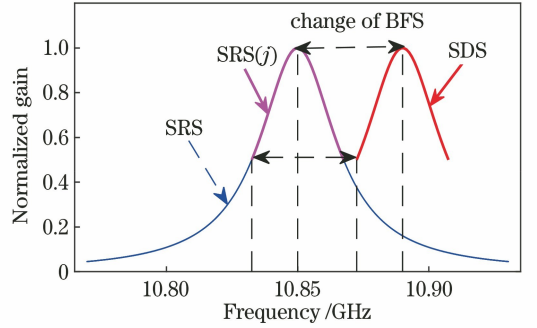


图 2 相似匹配方法原理图

Fig. 2 Schematic of similarity matching method

当光纤处于自然状态时, 获得的参考谱可以表示为

$$\{G(f_0 + mF_0) \mid m = 0, 1, \dots, M - 1\}, \quad (5)$$

式中: f_0 为参考谱的起始频率; M 为参考谱的扫频点数; F_0 为参考谱的扫频间隔。

当光纤受到温度或应变作用时, 获得的探测谱可以表示为

$$\{g(f + nF) \mid n = 0, 1, \dots, N - 1\}, \quad (6)$$

式中: f 为探测谱的起始频率; N 为探测谱的扫频点数; F 为探测谱的扫频间隔。

从频率 f_0 开始依次截取参考谱中扫频间隔为 F 的 N 个扫频点, 并计算获得参考谱与探测谱的一个相关系数。从 f_0 开始以 F_0 递增, 这样可以获得一组相关系数, 其中第 j 个相关系数可以表示为

$$C(j) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} [G(f_0 + jF_0 + iF) - \bar{G}_j][g(f + iF) - \bar{g}]}{\sqrt{\left\{ \sum_{i=0}^{N-1} [G(f_0 + jF_0 + iF) - \bar{G}_j]^2 \right\} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} [g(f + iF) - \bar{g}]^2 \right\}}}, \quad (7)$$

式中: \bar{g} 为探测谱的平均值; \bar{G}_j 为第 j 次截取的部分参考谱的平均值, 可表示为

$$\bar{G}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} G(f_0 + jF_0 + iF). \quad (8)$$

设 $j = J$ 时相关系数达到最大, 可以得到布里

渊频移的改变量 Δf :

$$\Delta f = f - (f_0 + JF_0). \quad (9)$$

2.3 算法有效性验证

为了验证基于相似匹配方法的布里渊频移提取算法的有效性, 本节分别采用基于 pseudo-Voigt 模

型和相似匹配方法的算法对实测谱进行布里渊频移计算。pseudo-Voigt 模型能较好逼近布里渊谱,无论是谱拟合结果还是布里渊频移计算结果都比较可靠,因此以 pseudo-Voigt 模型算法的结果作为准确值去验证相似匹配方法的准确性。通常的温升实验是将一小段光纤置于恒温箱或恒温槽中,可用于验证的谱数量较少。为了提高验证结果的可靠性,将一整盘光纤置入恒温环境中测量不同叠加平均次数下光纤沿线的布里渊谱,以两种情况下布里渊频移改变量随光纤沿线的变化作为参考对象,比较 pseudo-Voigt 模型算法和相似匹配方法的差异。由于频移本身基本不会影响算法的准确性,从定量误差的角度来说分析的结果与温度变化的结果一致,但谱信号数量的增加使得验证更充分。

基于布里渊光时域反射计(AV6419,中电科仪器仪表有限公司)搭建了光纤布里渊谱测量系统,所用光纤为 1 km 左右的普通单模光纤(G657.A2)。扫频范围为 10.52 ~ 10.92 GHz,扫频间隔为 1 MHz,入射脉冲光波长为 1550 nm,脉冲宽度为

10 ns,叠加平均次数分别为 2^{14} 和 2^{18} ,采用 pseudo-Voigt 模型算法得到一个线宽内的信噪比分别为 27.48 dB 和 32.74 dB。为了测量更多的谱,将采样分辨率设置为 0.1 m。实验在室温下进行,但由于绕制光纤承受了应变,布里渊频移会随光纤位置变化。参考谱和探测谱的扫频范围分别选择为线宽的 4 倍和 2 倍,后续仿真分析设置相同。两种情况下典型的布里渊谱如图 3(a)所示,采用 pseudo-Voigt 算法得到叠加平均次数为 2^{18} 时的光纤沿线布里渊频移如图 3(b)所示,两种方法得到的布里渊频移差距如图 3(c)所示,其幅值的均值为 0.30 MHz,最大差距近似为 1 MHz。另外,部分误差是因参考谱扫频间隔为 1 MHz 而产生的。两种算法平均计算时间分别为 87.89 ms 和 4.16 ms。两种方法计算结果差别不大,相似匹配方法准确性略低于基于 pseudo-Voigt 模型的算法,但计算量远小于后者,另外它无需考虑谱模型的选择,对复杂的布里渊谱具有一定的优势。因此,相似匹配方法在实际中有其应用范围,有必要分析各种因素对算法结果的影响。

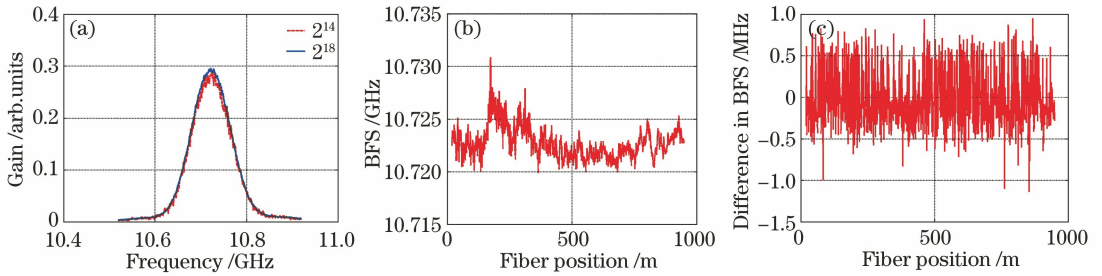


图 3 实测布里渊谱及频移计算结果。(a)计算用的布里渊谱;(b)叠加平均次数为 2^{18} 时模型方法算得的光纤沿线布里渊频移;(c)叠加平均次数为 2^{14} 时两种方法布里渊频移计算结果的差距

Fig. 3 Measured Brillouin spectrum and calculated frequency shift results. (a) Brillouin spectra for calculation; (b) BFS along the fiber by the model method when the average superposition is 2^{18} ; (c) difference in calculated BFS between the two methods when the average superposition is 2^{14}

3 影响因素分析

不同扫频参数下,实际布里渊谱测量时谱信号差异很大,非常有必要研究它们的取值对算法性能的影响。不失一般性,采用(1)式所示的洛伦兹模型产生单峰布里渊谱,考虑到实际单模光纤布里渊谱测量时相关参数的设置以及相似匹配方法的特性,设置参考谱和探测谱的线宽均为 35 MHz。参考谱的信噪比为 30 dB,扫频间隔为 1 MHz,扫频范围为 4 倍的线宽;探测谱的信噪比为 20 dB,扫频间隔为 3 MHz,扫频范围为 2 倍的线宽。分析某一参数的影响时,只改变该参数的值,其他参数保持不变。实际扫频过程中,扫频点未必能与实际布里渊频移重

合,这会明显影响算法的准确性,但现有研究容易忽略这一点,本文为了模拟真实情况考虑了这部分误差。另外,本文设置的参考谱的信噪比一般不低于探测谱的信噪比,原因是探测谱需要与参考谱进行匹配,一次实测的参考谱可以反复使用,增加叠加平均次数可提高参考谱的信噪比,从而既可以有效提高布里渊频移提取^[23]的准确性又不会对后续测量的实时性造成影响。

3.1 线宽

在实际应用中,为了提高空间分辨率需要减小泵浦脉冲的宽度,这会引起线宽的展宽。由 2.1 节可知,普通单模光纤的线宽约为 35 MHz,本文用布里渊光时域反射计对 G657.A2 型普通单模光纤进

行测量,实测结果表明当脉宽在 10~200 ns 范围内变化时线宽在 40~100 MHz范围内变化,考虑到光纤受到温度或应变影响后线宽可能存在波动,故仿真时设置参考谱和探测谱的线宽为30~100 MHz,其他参数与第 3 节第 1 段一致。不同探测谱点数下,线宽对频移提取准确性的影响结果如图 4 所示。其中,“3”表示扫频点数为 3,布里渊频移误差为仿真 10000 次后得到的误差幅值的平均值。注意,随着线宽的增加,参考谱和探测谱的扫频范围为线宽的整数倍一直保持不变,同时考虑到扫频点数会影响测量时间,为了保证单一因素变化,设置参考谱和探测谱的扫频点数保持不变(不随线宽变化而变化),即每次算法测量时间相同。

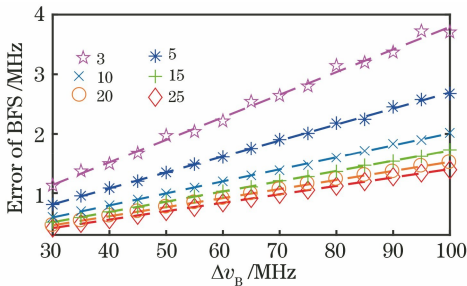


图 4 不同探测谱点数时,线宽对频移提取准确性的影响
Fig. 4 Influence of linewidth on frequency shift extraction accuracy under different sampling point number of SDS

由图 4 可以看出,当探测谱的扫频点数不变时,布里渊频移误差与线宽之间近似呈线性关系,具体可表示为

$$E_{\text{BFS}} = p \Delta\nu_B, \quad (10)$$

式中: $\Delta\nu_B$ 为参考谱和探测谱的线宽,单位为 MHz, p 为布里渊频移误差与线宽间的比例系数,参考谱和探测谱的线宽同步变化; E_{BFS} 表示布里渊频移误差,单位为 MHz。表 1 给出了按照(10)式进行线性拟合的结果,拟合线如图 4 虚线所示。表 1 中,SSE 和 RMSE 分别为拟合误差数据和原始误差数据的方差和均方根误差,两者越接近于 0 表示拟合效果越好。

表 1 线宽对频移提取准确性影响的拟合结果

Table 1 Fitting results of influence of linewidth on frequency shift extraction accuracy

Number of sampling points of SDS	p	SSE	RMSE
3	0.03795	0.05925	0.06606
5	0.02696	0.00489	0.0187
10	0.02003	0.00224	0.0126
15	0.01717	0.00083	0.0077
20	0.01528	0.00069	0.007
25	0.01402	0.00054	0.0062

由表 1 可知,拟合数据和原始误差数据的方差和均方根误差都很接近于 0,拟合效果较好,所以当探测谱的扫频点数不变时,布里渊频移误差与线宽之间存在线性关系。

3.2 仅探测谱线宽改变

温度和应变可能会影响探测谱的线宽,导致其与参考谱线宽未必一致,需要研究其对测量准确性的影响。文献[24]中的研究表明温度在-40~80 °C 范围内变化时线宽波动程度约为±15% (以 20 °C 时的线宽作为基准值),常规应变变化范围内线宽波动程度更小,文献[16]的结果也非常相似。文献[17]研究认为泵浦功率的起伏也会对布里渊增益谱的线宽产生影响,分析数据发现功率变化范围内线宽波动明显小于±15%。因此,后续计算中线宽的波动程度取±15%。设置参考谱的线宽为 35 MHz,探测谱的线宽变化范围为 30~40 MHz,线宽变化时其扫频范围始终为 2 倍线宽,其他参数与第 3 节第 1 段一致,探测谱线宽与参考谱线宽不一致对算法的影响如图 5 所示。

由图 5 可知,随着探测谱线宽的增加,误差存在增大的趋势,探测谱信噪比为 0 dB、10 dB、20 dB 和 30 dB,线宽为 30 MHz 时,以上 4 种情况的布里渊频移误差分别为 4.45,1.44,0.6,0.36 MHz,40 MHz 时误差分别为 6.05,1.88,0.72,0.385 MHz。布里渊频移误差不是随探测谱相对于参考谱线宽改变量的增加而增大,而是随探测谱线宽的增加基本上成正比增加(信噪比较高时误差较小,其他参数的影响增大,该规律不再严格成立,但也是线性增大),这与 3.1 节线宽对布里渊频移误差的影响规律吻合。分析后认为,误差增加的主要原因是探测谱线宽增加,而不是二者的不完全匹配,由于探测谱与参考谱线宽不一致导致的布里渊频移误差较小,基本可以忽略。

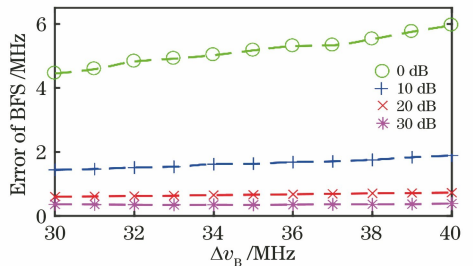


图 5 不同探测谱信噪比下,探测谱线宽对算法准确性的影响
Fig. 5 Influence of linewidth of SDS on algorithm accuracy under different SNR of SDS

3.3 参考谱的信噪比

参考谱信噪比过低则产生的误差较大。分析其

信噪比对频移提取准确性的影响规律时,为使结果覆盖范围更广从而提高分析的可靠性,设置参考谱的信噪比为 20 dB~40 dB,探测谱的信噪比范围为 0 dB~20 dB,其他参数与第 3 节第 1 段相同。参考谱信噪比对频移提取准确性的影响结果如图 6 所示。

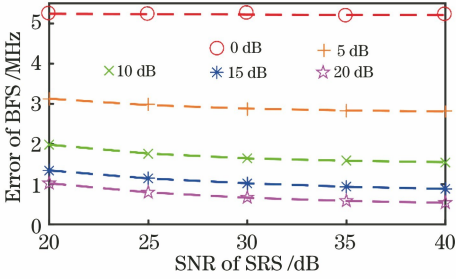


图 6 不同探测谱信噪比下,参考谱信噪比对频移提取准确性的影响

Fig. 6 Influence of SNR of SRS on frequency shift extraction accuracy under different SNR of SDS

由图 6 可以看出,布里渊频移误差与参考谱的信噪比基本成指数规律变化,两者的关系式可表示为

$$E_{\text{BFS}} = a \exp(bR_{\text{SN}}) + c, \quad (11)$$

式中: R_{SN} 为参考谱的信噪比,单位为 dB; E_{BFS} 表示布里渊频移误差,单位为 MHz。按照(11)式拟合的结果如图 6 中虚线所示,同时表 2 给出了参数拟合的结果数据。

表 2 参考谱信噪比对频移提取准确性影响的拟合结果
Table 2 Fitting results of influence of SNR of SRS on frequency shift extraction accuracy

SNR of SDS / dB	a	b	c	SSE	RMSE
0	0.2625	-0.0075	5.013	0.0004	0.0206
5	3.845	-0.1197	2.778	0.0001	0.1261
10	5.6613	-0.124	1.5089	0.0003	0.0061
15	3.1407	-0.0867	0.7862	0.0002	0.0005
20	4.5399	-0.1054	0.4717	0.0001	0.0026

随着参考谱信噪比的提高,误差逐渐减小,同时误差的变化幅度也逐渐减小,当参考谱的信噪比达到 30 dB 时,误差基本保持不变。在扫频时,通常利用时域叠加平均技术来改善信噪比,一般叠加平均次数增加到原来的 4 倍时信噪比提高 6 dB,但增加平均次数测量时间也会随之增加。因此,参考谱的信噪比选择 30 dB 可保持较高的频移提取准确性。

3.4 探测谱的信噪比

考虑到 3.3 节中参考谱信噪比达到 30 dB 可得到较高的准确性,将参考谱信噪比分别设置为 30 dB、35 dB 和 40 dB,为了系统地分析探测谱信噪比对频移

提取准确性的影响,仿真时设置其范围为 0 dB~30 dB,其他参数与第 3 节第 1 段一致。参考(11)式对布里渊频移误差进行拟合,图 7 为探测谱的信噪比为 0 dB~30 dB 时得到的误差,其中虚线为拟合结果。

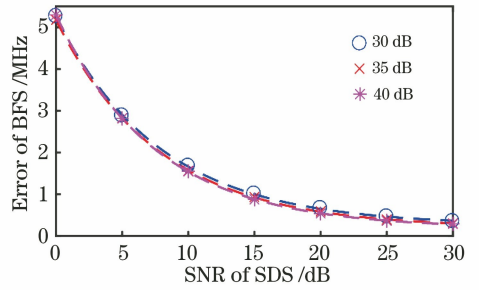


图 7 不同参考谱信噪比下,探测谱信噪比对频移提取准确性的影响

Fig. 7 Influence of SNR of SDS on frequency shift extraction accuracy under different SNR of SRS

由图 7 可以看出,当参考谱信噪比保持不变时,布里渊频移误差与探测谱的信噪比成指数规律变化,表 3 给出了按照(11)式拟合的结果,此时 R_{SN} 为探测谱的信噪比。

表 3 探测谱信噪比对频移提取准确性影响的拟合结果
Table 3 Fitting results of influence of SNR of SDS on frequency shift extraction accuracy

SNR of SRS / dB	a	b	c	SSE	RMSE
30	5.001	-0.1269	0.254	0.0013	0.0183
35	4.983	-0.1284	0.1958	0.0004	0.0107
40	5.116	-0.1327	0.1815	0.0002	0.0082

由表 3 可知,布里渊频移误差随探测谱信噪比的增加成指数规律减少。由图 7 可以看出,当探测谱的信噪比达到 20 dB 后,误差都在 1 MHz 以内,再增加探测谱的信噪比,误差的变化较小。因此,应用相似匹配方法提取布里渊频移时在通常情况下探测谱信噪比可选择 20 dB。同时可以看出,当参考谱的信噪比为 30 dB、35 dB 和 40 dB 时,频移提取的准确性变化不大,这与图 6 的结果吻合。

3.5 参考谱的扫频间隔

考虑到探测谱扫频间隔需为参考谱扫频间隔的整数倍,结合谱测量的实际情况,不失一般性,设置探测谱的扫频间隔为 5 MHz,参考谱的扫频间隔为探测谱的 1/10~1,其他参数与第 3 节第 1 段一致。参考谱扫频间隔对布里渊频移提取准确性的影响如图 8 所示。

由图 8 可以看出,随参考谱扫频间隔增加频移误差有增加的趋势,尤其是探测谱信噪比较高时。

当参考谱扫频间隔大于 1 MHz 时,随着参考谱扫频间隔的增加,误差缓慢增大,另外过小的扫频间隔会使计算时间明显增加。综合考虑,参考谱的扫频间隔可选择 1 MHz。

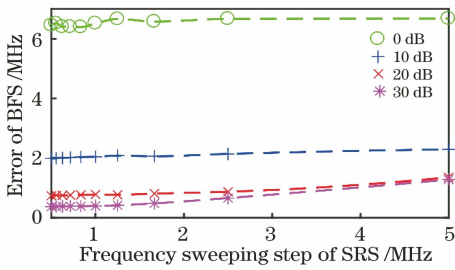


图 8 不同探测谱信噪比下,参考谱扫频间隔对频移提取准确性的影响

Fig. 8 Influence of sweeping step of SRS on frequency shift extraction accuracy under different SNR of SDS

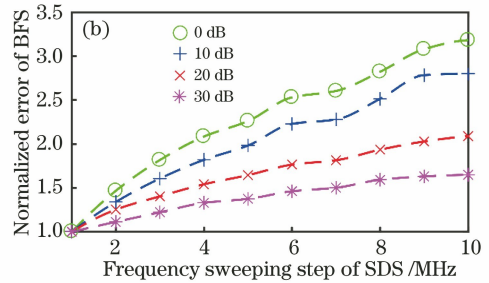
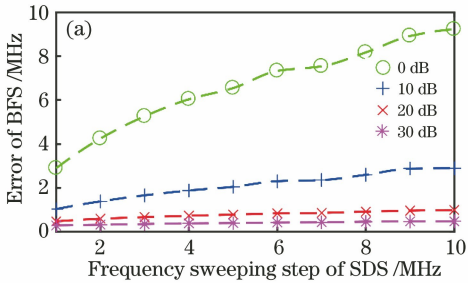


图 9 不同探测谱信噪比下,探测谱扫频间隔对频移提取准确性的影响。(a) 频移提取误差;(b) 归一化频移提取误差

Fig. 9 Influence of sweeping step of SDS on frequency shift extraction accuracy under different SNR of SDS.

(a) Error of BFS; (b) normalized error of BFS

3.7 参考谱的扫频范围

利用相似匹配方法提取布里渊频移时,参考谱的扫频范围应包含探测谱的扫频范围,由于探测谱的扫频范围设置为 2 倍线宽,所以将参考谱的扫频范围设置为 3~15 倍的线宽,其他参数与第 3 节第 1 段一致。注意,参考谱扫频范围变化过程中其扫频间隔一直保持不变。参考谱扫频范围对频移提取准确性的影响结果如图 10(a) 所示,算法运行时间如图 10(b) 所示,图中虚线为拟合曲线。

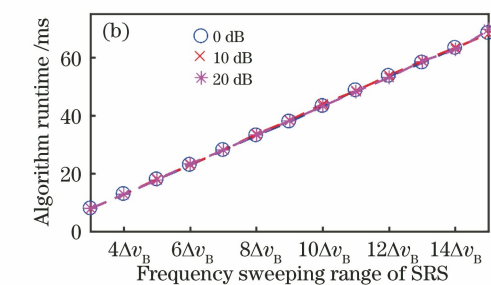
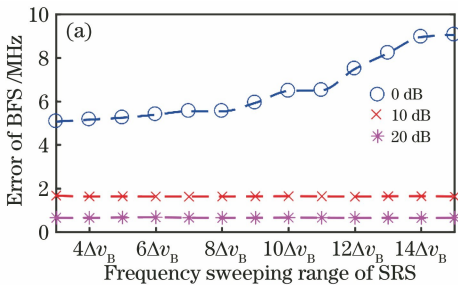


图 10 不同探测谱信噪比下,参考谱扫频范围对频移提取准确性的影响。(a) 频移提取误差;(b) 算法运行时间

Fig. 10 Influence of sweeping range of SRS on frequency shift extraction accuracy under different SNR of SDS.

(a) Error of BFS; (b) algorithm runtime

3.6 探测谱的扫频间隔

设置参考谱的扫频间隔为 1 MHz,探测谱的扫频间隔分别为参考谱的 1~10 倍,其他参数与第 3 节第 1 段一致。探测谱扫频间隔对布里渊频移提取准确性的影响如图 9(a) 所示,参考谱的扫频间隔为 1 MHz 时误差的归一化结果如图 9(b) 所示,图中虚线为拟合曲线。

由图 9 可以看出,当探测谱信噪比不变时,随着扫频间隔的增加,布里渊频移误差逐渐增加,尤其对于探测谱信噪比较低的情况增加比较明显。同时,考虑到该方法的特点是实时性比较高,因此,综合考虑,探测谱的扫频间隔可选择 3 MHz。具体应用时如果对准确性要求较高或探测谱信噪比较低,则其扫频间隔应该选择较小值。

更小一些的扫频范围能实现较少的计算时间和较小的频移提取误差。由图 10 可知,本文的参考谱扫频范围为 4 倍线宽也是一个不错的选择。实际应用中可以根据具体情况适当调节。

3.8 探测谱的扫频范围

设置参考谱扫频范围为 4 倍的线宽,探测谱扫频范围为 0.5~3 倍的线宽,其中探测谱扫频范围变化时保持扫频点数不变,其他参数与第 3 节第 1 段一致,探测谱扫频范围对布里渊频移提取准确性的影响如图 11 所示。图 11(a)为不同信噪比情况下探测谱扫频范围关于频移对称时的频移误差,图 11(b)为探测谱扫频范围关于频移不完全对称且信噪比为 20 dB 时的误差,其中,“ $0.1\Delta v_B$ ”表示布里渊频移与扫频范围中最高频率的差距为 $0.1\Delta v_B$,这

是本例中扫频范围偏差最大的情况。

由图 11(a)可以看出,在探测谱对称的情况下,其扫频范围较小时,频移误差随探测谱扫频范围的增加而减少,在 2 倍线宽时误差最小,然后误差基本保持不变,甚至略有增加。由图 11(b)可以看出,探测谱不完全对称的情况下可以得到类似的结论,在探测谱扫频范围为 2 倍线宽时频移提取准确性最高,尤其是扫频范围偏差较大时更明显。随着对称性的增强,误差逐渐减小。因此,综合考虑探测谱的扫频范围可选择 2 倍的线宽。另外,图中 $0.5v_B$ 所对应的扫频范围偏差已然较大,但相似匹配方法的误差却并不大,这表明该方法具有较强的抗扫频范围偏差导致的布里渊频移提取误差的能力。

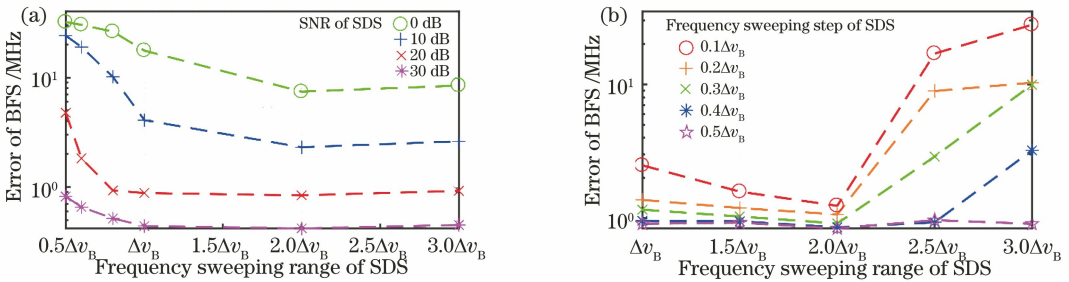


图 11 探测谱扫频范围对频移提取准确性的影响。(a)探测谱关于频移对称;(b)探测谱不完全对称

Fig. 11 Influence of sweeping range of SDS on frequency shift extraction accuracy.

(a) SDS symmetrical about v_B ; (b) SDS not symmetrical about v_B

4 结 论

在验证相似匹配方法有效性的基础上,本文研究了线宽、信噪比、扫频间隔、扫频范围对基于该方法的布里渊频移提取准确性的影响规律。在保持扫频点数不变的情况下,当参考谱和探测谱的扫频范围与线宽比值固定时,频移误差与线宽成线性关系。排除线宽对频移误差影响后仅仅由探测谱与参考谱线宽不一致导致的布里渊频移误差较小。频移误差随参考谱和探测谱信噪比的增加成指数规律减小。随着扫频间隔的增加,频移误差有增加的趋势。扫频间隔不变时,随参考谱扫频范围增加误差有增加的趋势,在包含探测谱范围的基础上,参考谱可适当选择较小的扫频范围。扫频点数不变时,探测谱扫频范围为 2 倍线宽时频移误差最小。参考谱和探测谱的扫频范围可分别选择为 4 倍和 2 倍线宽。以上参数可根据实际要求适当调整。研究结果可为布里渊频移的准确提取提供参考。

参 考 文 献

- [1] Xiao S H, Li L. New fitting method for Brillouin-based scattering spectrum of fibre-optic distributed sensing systems [J]. Optical Technique, 2009, 35 (6): 897-900, 904.
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, 904.
- [2] Zhang Y D, Li J Q, Meng C N, et al. Hybrid optimization algorithm of Brillouin scattering spectra fitting [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(9): 091013.
张有迪, 李嘉琪, 孟钊楠, 等. 布里渊散射谱拟合的混合优化算法 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(9): 091013.
- [3] Hao Y Q, Ye Q, Cai H W. Lorentz fitting analysis of Brillouin scattering in BOTDR sensing system [J]. Laser Journal, 2016, 37(5): 15-17.
郝蕴琦, 叶青, 蔡海文. 基于 BOTDR 布里渊散射的洛伦兹拟合准确度分析 [J]. 激光杂志, 2016, 37 (5): 15-17.
- [4] Li X J, Li Y Q, Hu Z Q, et al. Features extraction

- of Brillouin scattering spectra in multi-wavelength BOTDR system [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2016, 27(12): 1286-1292.
- 李晓娟, 李永倩, 胡智奇, 等. 多波长 BOTDR 系统中布里渊散射谱的特征提取 [J]. *光电子 • 激光*, 2016, 27(12): 1286-1292.
- [5] Xu Z N, Zhao L J. Estimation of error in Brillouin frequency shift in distributed fiber sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(4): 1829-1837.
- [6] Zhou D W, Dong Y K, Wang B Z, et al. Single-shot BOTDA based on an optical chirp chain probe wave for distributed ultrafast measurement [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 32.
- [7] Wang B Z, Hua Z J, Pang C, et al. Fast Brillouin optical time-domain reflectometry based on the frequency-agile technique [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(4): 946-952.
- [8] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(17): 2613-2615.
- [9] Xu Z N, Hu Y H, Zhao L J, et al. A rapid temperature and strain measurement method for optic-electric composite submarine cable based on slope-assisted technique [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(5): 202-208.
- 徐志钮, 胡宇航, 赵丽娟, 等. 基于单斜坡法的光电复合海缆温度、应变快速测量方法 [J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(5): 202-208.
- [10] 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.
- [11] Xu Z N, Hu Y H, Zhao L J, et al. Fast and highly accurate Brillouin frequency shift extracted algorithm based on modified quadratic polynomial fit [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(3): 842-848.
- 徐志钮, 胡宇航, 赵丽娟, 等. 基于改进二次多项式拟合的布里渊频移快速高精度提取算法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(3): 842-848.
- [12] 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.
- [13] Shang Q F, Hu Y T, Liu W. Feature extraction of Brillouin scattering spectrum based on cross-correlation convolution and high-order centroid calculation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106011.
- 尚秋峰, 胡雨婷, 刘薇. 基于互相关卷积与高阶矩质心计算的布里渊散射谱特征提取 [J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106011.
- [14] Wang F, Zhan W W, Lu Y G, et al. Determining the change of Brillouin frequency shift by using the similarity matching method [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(19): 4101-4108.
- [15] An Q. Theoretical and experimental research on the characteristics and applications of vector stimulated Brillouin scattering [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 21-22.
- 安琪. 矢量受激布里渊散射特性及其应用的理论与实验研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 21-22.
- [16] Bao X Y, Smith J, Brown A W. Temperature and strain measurements using the power, line-width, shape, and frequency shift of the Brillouin loss spectrum [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4920: 311-322.
- [17] Motil A, Hadar R, Sovran I, et al. Gain dependence of the linewidth of Brillouin amplification in optical fibers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27535-27541.
- [18] Zhang Y J, Yu C J, Fu X H, et al. An improved Newton algorithm based on finite element analysis for extracting the Brillouin scattering spectrum features [J]. *Measurement*, 2014, 51: 310-314.
- [19] Pan Y H, Lu Y G, Peng J Q, et al. Brillouin gain spectrum characteristics of photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0619001.
- 潘宇航, 路元刚, 彭键钦, 等. 光子晶体光纤的布里渊增益谱特性 [J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0619001.
- [20] Liang H, Zhang X P, Li X H, et al. Design and implementation of data fitting algorithm for Brillouin back scattered-light spectrum data [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4): 875-879.
- 梁浩, 张旭苹, 李新华, 等. 布里渊背向散射光谱数据拟合算法设计与实现 [J]. *光子学报*, 2009, 38(4): 875-879.
- [21] Liu X, Bao X Y. Brillouin spectrum in LEAF and simultaneous temperature and strain measurement [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1053-1059.
- [22] Yoo J C, Han T H. Fast normalized cross-correlation [J]. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 2009, 28(6): 819-843.
- [23] Shang Q F, Hu Y T, Liu W. Research on Brillouin frequency shift extraction method of BOTDA sensing system [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(5): 633-638, 669.
- 尚秋峰, 胡雨婷, 刘薇. BOTDA 传感系统的布里渊

- 频移提取方法研究进展[J]. 半导体光电, 2017, 38(5): 633-638, 669.
- [24] Nikles M, Thevenaz L, Robert P A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(10): 1842-1851.