

基于 Armijo 线搜索的布里渊散射谱图像降噪算法

尚秋峰, 秦文婕*, 胡雨婷

华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003

摘要 为提高布里渊光时域分析(BOTDA)系统的信噪比,减少累计平均次数,改善实时性的同时保障测量精度,提出了基于 Armijo 线搜索的 BOTDA 散射谱图像降噪算法。该算法从能量扩散的角度利用偏微分方程的各向异性保证降噪图像具有良好的边缘保持特性,基于图像的局部特征提高了传感系统的测量精度。运用 Armijo 回溯线搜索法自适应选取最速下降步长,对 256 次累计平均的 BOTDA 实验数据进行降噪处理,只需两步迭代,即可达到最佳降噪效果,有效减少了数据采集时间,提高了系统的实时性。

关键词 光纤光学; 布里渊光时域分析; 散射谱; 图像; Armijo 线搜索; 降噪

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0906002

Brillouin Scattering Spectral Image Denoising Algorithm Based on Armijo Line Search

Shang Qiufeng, Qin Wenjie*, Hu Yuting

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

Abstract To improve the signal-to-noise ratio of a Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) system, reduce the cumulative average number, and improve the real-time performance while ensuring measurement accuracy, a BOTDA scattering spectrum image denoising algorithm based on Armijo line search is proposed. The method uses the anisotropy of the partial differential equation from the perspective of energy diffusion to ensure that the noise-reduced image has good edge-holding characteristics and improves the measurement accuracy of the sensing system based on local features. The Armijo retrospective search method is used to adaptively select the steepest descending step size, and 256 cumulative average BOTDA experimental data are denoised. The best noise reduction effect can be achieved in just two iterations, which effectively reduces data acquisition time, thereby improving the real-time performance of the system.

Key words fiber optics; Brillouin optical time domain analysis; scattering spectrum; image; Armijo line search; noise reduction

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.4370

1 引言

布里渊光时域分析(BOTDA)广泛应用于温度和应变的传感监测^[1-2]。BOTDA 信号从产生、传输到接收会引入一系列噪声,主要有激光器噪声、多径瑞利散射噪声、光电探测器噪声和偏振噪声等。噪声的存在会严重影响 BOTDA 传感系统的测量精度和实时性等性能参数。因此,信噪比(SNR)是衡量 BOTDA 系统性能的关键指标之一。文献[3]中

的传统 BOTDA 技术通过提高脉冲光的峰值功率和增加累计平均次数提高了系统的信噪比。受光纤损耗及光纤中非线性效应的限制,探测光脉冲的峰值功率不能无限增加,并且当累计平均次数增加到一定程度后,不仅测量时间延长,而且信噪比的改善效果也趋于饱和。因此,本文考虑采用优良的降噪算法对布里渊散射谱进行降噪处理,以期在相同信噪比条件下,减少平均次数,提高系统的实时性。

在 BOTDA 传感领域,2011 年, Farahani 等^[4]

收稿日期: 2019-04-10; 修回日期: 2019-05-06; 录用日期: 2019-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(61775057)、河北省自然科学基金(E2019502179)

* E-mail: 15176267905@163.com

将小波阈值收缩法应用于 BOTDA 系统,采用阈值收缩增强时域波形后再累加平均,将需要采集的时域波形数目减少 92%,大大缩短了系统的测量时间。2012 年, Farahani 等^[5]采用自适应滤波技术对 BOTDA 信号进行预处理,在相同信噪比下的测量时间减少 90%。上述算法在一维空间分别对各扫描频率下的测量信号降噪,仅去除了测量信号在时域的相关性,忽略了不同扫描频率下测量信号的结构相似性和冗余性。2015 年, Soto 等^[6]用高斯滤波、非局部均值(NLM)、频域变换降噪和二维离散小波变换等 4 种基础图像降噪方法对 BOTDA 传感测量系统进行浮点降噪,证明了图像处理算法提高 BOTDA 系统信噪比的可行性。2016 年, Soto 等^[7]改进降噪方法,评估 BOTDA 数据在二维空间中所具有的高度相似性和冗余性,选用传统的图像和视频处理方法对受限的白噪声进行剔除,保持高频的测量分量,弥补低通滤波的不足,但实验结果仍然是基于简单的图像/视频处理。2017 年, Soto 等^[8]采用 NLM 滤波算法对 BOTDA 信号进行处理,克服了线性滤波算法的图像模糊、空间过于平滑和丢失高频细节等缺点。但 NLM 算法计算要求高、耗时多,难以保证实时性。2018 年, 孟彦杰等^[9]采用 Kuwahara 滤波方法对 BOTDA 传感图像降噪,信噪比提高了 6.7 dB,与第二年提出的约束最小二乘滤波(CLS)的自适应图像恢复方法相比^[10],信噪比增加了 12.2 dB,温度精度提高到 1.3 °C。

本文提出了一种保持布里渊频谱边缘特性的降噪算法,该算法强调谱变化细节的降噪处理,保留高频测量分量,基于局部特征提高传感系统的测量精度。该方法将偏微分方程的各向异性扩散方程用于图像降噪,在平滑噪声的同时,保持频谱边缘。采用优化的线搜索策略,使降噪算法学习率自适应变化,提高了信噪比,减少了累计平均次数,达到了改善实时性的目的,提升了 BOTDA 系统的传感效率。

2 算法设计与实现

2.1 算法原理

该算法的降噪可以归结为求极小值问题,在满足观测值的条件下,获得信号最稀疏解的过程,实质为一种无约束凸优化问题。设图像噪声模型为

$$\mathbf{u}_0(x, y) = \mathbf{u}(x, y) + \mathbf{n}(x, y), \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}_0(x, y)$ (简称为 \mathbf{u}_0)为 BOTDA 传感系统采集的二维布里渊增益谱矩阵; $\mathbf{u}(x, y)$ (简称为 \mathbf{u})为需提取的布里渊频移矩阵; x 为沿光纤长度的采样

点数; y 为扫描频率; $\mathbf{n}(x, y)$ 为均方差为 σ 的高斯白噪声。将每个数据点看作像素点,则 BOTDA 传感系统的三维布里渊增益频谱(BGS)可看作是一幅二维数字图像。在本文提出的图像降噪算法中,对图像的相邻像素点求差值总和 $T_V(\mathbf{u})$ 最小化,以达到平滑目的,则

$$\min T_V(\mathbf{u}) = \iint_{\Omega} |\nabla \mathbf{u}| dx dy, \quad (2)$$

式中: ∇ 为偏微分算子; Ω 为包括光纤长度和扫描范围的图像区域。像素点 $\mathbf{u}_0(x, y) \in \Omega$ 最小化能量泛函^[11-13]形式为

$$\min E(\mathbf{u}) = \frac{\lambda}{2} \iint_{\Omega} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_0)^2 dx dy + T_V(\mathbf{u}) = \iint_{\Omega} \left[|\nabla \mathbf{u}| + \frac{\lambda}{2} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_0)^2 \right] dx dy, \quad (3)$$

式中: E 为能量泛函; λ 为拉格朗日因子,与噪声水平有关。(3)式中加号的前一项为逼近项,用于保持原图像边缘特性;后一项为正则项,起图像平滑的作用。由(3)式导出能量泛函存在极值的必要条件,即满足欧拉-拉格朗日方程

$$\lambda(\mathbf{u} - \mathbf{u}_0) - \nabla \left(\frac{\nabla \mathbf{u}}{|\nabla \mathbf{u}|} \right) = 0, \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sigma^2 |\Omega|} \iint_{\Omega} \nabla \left(\frac{\nabla \mathbf{u}}{|\nabla \mathbf{u}|} \right) (\mathbf{u} - \mathbf{u}_0) dx dy. \quad (5)$$

λ 作为逼近项因子,取值不当时会使图像的背景、边缘等具有不同信噪比分布的区域,容易出现边缘模糊和阶梯效应等现象。

按照最速下降法^[14]离散化(4)式得到迭代演化公式为

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n - \alpha_n \lambda (\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_0) + \alpha_n \left[\nabla \left(\frac{\nabla \mathbf{u}_n}{|\nabla \mathbf{u}_n|} \right) \right], \quad (6)$$

式中: $n \in [0, I]$, I 为迭代次数; α_n 为最速下降方向步长; \mathbf{u}_n 为第 n 次迭代的结果。用像素点 $\mathbf{u}(i, j)$ 的八邻域差分代替偏导计算 $\nabla \left(\frac{\nabla \mathbf{u}_n}{|\nabla \mathbf{u}_n|} \right)$ 。

为了以最小代价找到极小值点的近似,减少降噪处理的时间,采用基于 Armijo 准则^[15]的回溯线搜索得到每次搜索方向对应的下降步长,并采用梯度下降法确定搜索方向。Armijo 准则^[15]表示为

$$E(\mathbf{u}_n + \sigma^{\beta_k} \cdot \mathbf{p}_n) \leq E(\mathbf{u}_n) + \varepsilon \cdot \sigma^{\beta_k} \cdot m, \quad (7)$$

其中,

$$m = \mathbf{p}_n^T \nabla E(\mathbf{u}_n), \quad (8)$$

$$\mathbf{p}_n = -\lambda(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_0) + \nabla \left(\frac{\nabla \mathbf{u}_n}{|\nabla \mathbf{u}_n|} \right). \quad (9)$$

首先,在搜索方向上设置一个初始步长,通过(7)式所示的 Armijo 准则判断当前的步长是否合适。如果步长较小,则利用参数 τ 进行放大,即 $\beta_{k+1}=\tau\beta_k$ (β_{k+1} 和 β_k 为相邻两次迭代的步长, k 为迭代次数),直至满足 Armijo 准则,得到当前搜索方向 \mathbf{p}_n 上的自适应下降步长 $\alpha_n=\beta_k$,其中常数计算因子 $0<\sigma<1,0<\varepsilon<0.5$ 。

2.2 算法实现

算法实施步骤如图 1 所示,第 n 次梯度下降时,已知 \mathbf{u}_n ,先采用八邻域差分代替偏导求得 \mathbf{p}_n ,为了得到 \mathbf{u}_{n+1} ,需要找到快速寻优的自适应下降步长。初始选取下降步长 $\beta_0=0.1$,判断 Armijo 准则,若不满足 Armijo 准则,则按因子 τ 扩大步长,直至得到满足 Armijo 准则的 β_k ,则当前搜索方向 \mathbf{p}_n 的下降步长 $\alpha_n=\beta_k$,进一步得到 \mathbf{u}_{n+1} 。当满足终止控制条件时,迭代停止,输出降噪图像,否则回到上一步继续迭代。

3 实验数据分析

3.1 实验系统

本文采用的 Rayleigh-BOTDA 实验系统如图 2 所示。EOM1 输出如 a) 所示的 0 阶脉冲光,EOM2 工作在传输特性曲线的谷点,输出如 b) 所示的 1 阶双边带连续光(光信号经由频率为 f_m 的微波信号调制),合成光信号如 c) 所示,经 EDFA 放大、FBG1

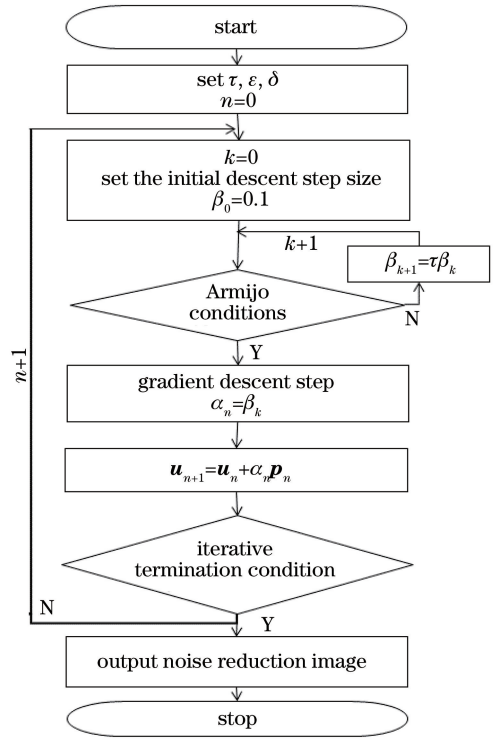


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

滤波后通过光环形器 C1 (C1、C2、C3、C4 均为光环形器) 进入传感光纤。脉冲基底的 1 阶上下边带产生后向瑞利散射光,与 0 阶脉冲光发生受激布里渊散射作用。

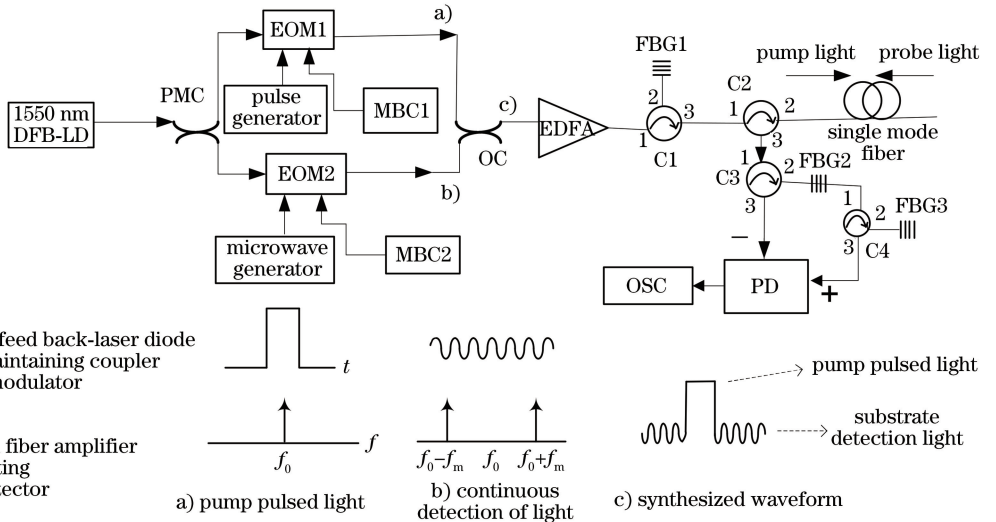


图 2 Rayleigh-BOTDA 传感系统

Fig. 2 Rayleigh-BOTDA sensing system

将传感光纤中段置于恒温槽升温至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,其余光纤置于室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下。设置扫频范围为 $10.80\sim 10.91\text{ GHz}$,步长 5 MHz ,累计平均 10000 次,实验采集的三维布里渊散射谱如图 3 所示,明显可见,在

光纤中段有较大的布里渊频移(BFS)偏移。

3.2 拉格朗日因子对 BFS 提取的影响

拉格朗日因子 λ 是影响降噪效果的关键,在全变分(3)式所示模型中,该因子用于平衡图像的保真

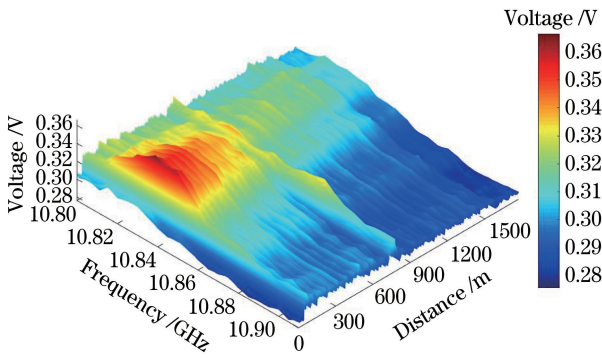


图3 三维布里渊散射谱

Fig. 3 Three-dimensional Brillouin scattering spectrum

性与平滑性。 λ 越大,降噪图像保留的高频细节越多; λ 越小,图像越平滑。为比较 λ 对降噪效果的影响,

设置固定下降步长 α 为0.1,求解全变分(TV)降噪模型,迭代60次终止。如图4所示,分别得到 $\lambda=0, 0.5, 1$ 对应的三维布里渊散射谱降噪图像的正视图。

由图4可见,不同 λ 的选取影响信号的保真性,过度平滑会导致信号被削弱,趋于平坦,间接影响BFS的提取精度。随着传感距离的增加,信号逐渐减弱,当出现BFS变化时,BGS发生平移且波峰幅值较小。若降噪过于平滑,则微弱的局部特征信号将被削弱,从而对传感物理量变化区域的BFS造成较大误差。将 $\lambda=0$ 和 $\lambda=1$ 降噪后的布里渊散射谱分别进行Lorentz拟合,得到光纤的BFS如图5所示。

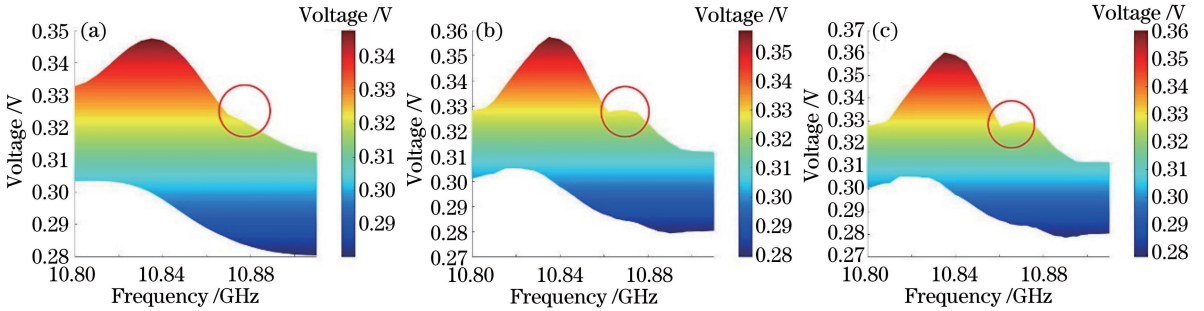


图4 不同 λ 下的降噪图像正视图。(a) $\lambda=0$;(b) $\lambda=0.5$;(c) $\lambda=1$

Fig. 4 Front views of noise reduction image with different λ . (a) $\lambda=0$; (b) $\lambda=0.5$; (c) $\lambda=1$

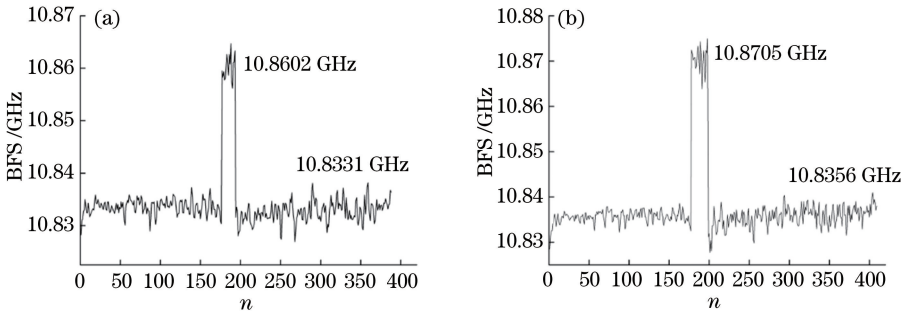


图5 不同 λ 下的BFS。(a) $\lambda=0$;(b) $\lambda=1$

Fig. 5 BFS under different λ . (a) $\lambda=0$; (b) $\lambda=1$

由图5可见: $\lambda=0$ 时,加温区域的平均BFS为10.8602 GHz; $\lambda=1$ 时,加温区域的平均BFS为10.8705 GHz,差值为10.3 MHz。可知,经平滑降噪提取的BFS与保留细节降噪提取的BFS存在较大差异。按上述计算方式,对不同 λ 下的加温和常温区域的BFS(图6)进行平均,并按照标定系数0.9802 MHz/°C换算成相应的温差,如图7所示,实验环境中,常温与加温区域的温差为35 °C,可知 λ 越接近1,BFS提取准确度越高。

3.3 Armijo 线搜索与固定步长下降的对比

设置初始下降步长 $\beta_0=0.1$,拉格朗日因子 $\lambda=1, \tau=2, \sigma=0.4, \epsilon=0.2$,设 $\alpha_n < 10^{-5}$ 时迭代终止。得到迭代次数 n 及下降步长 α_n 对应的降噪图像,如图8所示。经过两步迭代, $\alpha_2=4.2215 \times 10^{-21}$,图像的变化趋于稳定,下降步长无限趋近0,达到了TV模型极值点的近似。可见,结合Armijo线搜索的最速下降法能自适应调整梯度下降步长,极快速地寻得局部最优,大大减少了迭代次数。

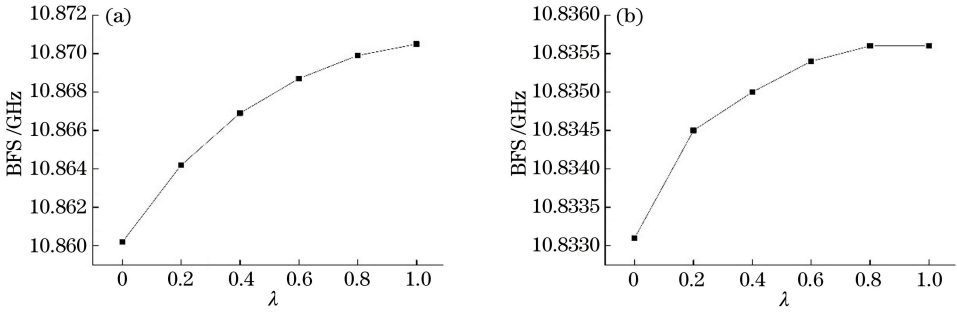


图 6 常温和加温区域 BFS 和 λ 关系曲线。(a) 常温; (b) 加温

Fig. 6 Relationship between BFS and λ in normal and heating temperature regions.

(a) Normal temperature; (b) heating temperature

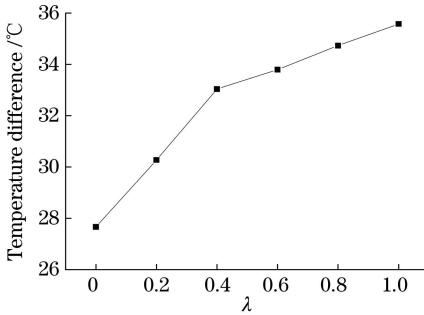


图 7 不同 λ 下提取的温差

Fig. 7 Temperature differences extracted under different λ

设置 TV 模型按固定下降步长 $\alpha = 0.1$ 进行迭代数值求解, 拉格朗日因子 $\lambda = 1$, 计算 TV 模型每次梯度下降后 $\| \mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_n \| / \| \mathbf{u}_n \|$ 的值, 结果如

图 9 所示。 $\| \mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_n \| / \| \mathbf{u}_n \|$ 表征了梯度下降的收敛程度, 其值过大, 说明噪声去除效果差, 未达到 TV 模型极值点; 其值过小, 则可能直接越过极值点, 导致发散, 有用信号被削弱。

由图 9 可见, 迭代次数 $n > 10$ 时, $\| \mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_n \| / \| \mathbf{u}_n \|$ 趋于平稳, 降噪效果逐渐变好。将固定步长最速下降法每次迭代后的降噪图像与采用 Armijo 线搜索优化的降噪结果图像求均方误差 (MSE), 得到曲线如图 10 所示。当 $n = 13$ 时, 均方误差最小, 可见固定步长迭代需要迭代 13 次才与自适应 Armijo 迭代 2 次的降噪效果相近。可以证明, 基于 Armijo 线搜索的最速下降法对 TV 模型具有更快的数值求解速度, 实时性更高。

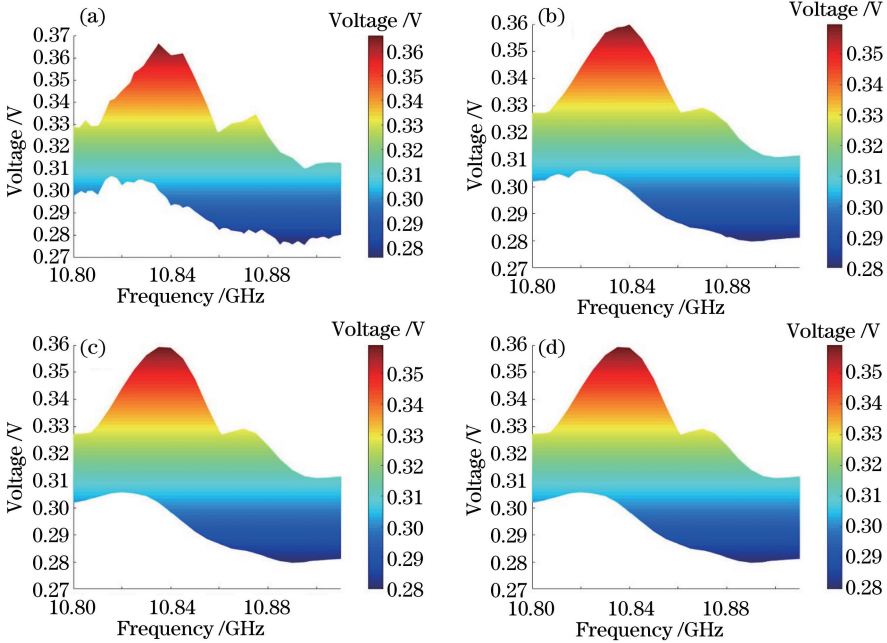


图 8 降噪图像随迭代次数的变化。(a) $n=0, \alpha_0=0.9124$; (b) $n=1, \alpha_1=0.2308$;

(c) $n=2, \alpha_2=4.2215 \times 10^{-21}$; (d) $n=3, \alpha_3=4.2215 \times 10^{-21}$

Fig. 8 Variation in noise reduction image with number of iterations. (a) $n=0, \alpha_0=0.9124$;

(b) $n=1, \alpha_1=0.2308$; (c) $n=2, \alpha_2=4.2215 \times 10^{-21}$; (d) $n=3, \alpha_3=4.2215 \times 10^{-21}$

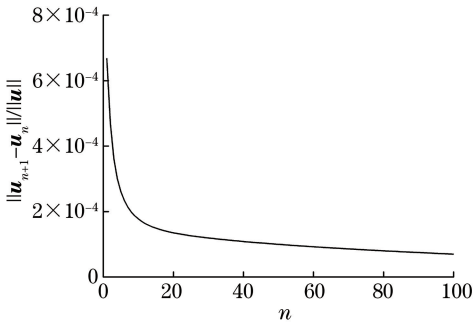


图 9 $\|u_{n+1} - u_n\| / \|u_n\|$ 的值随迭代次数的变化
Fig. 9 Variation in value of $\|u_{n+1} - u_n\| / \|u_n\|$ with number of iterations

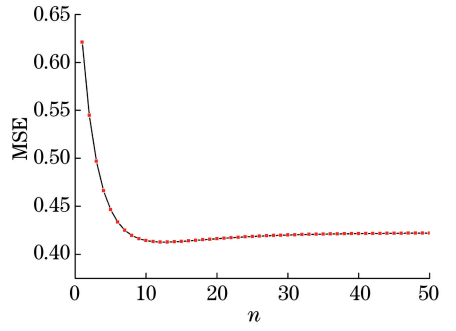


图 10 MSE 随迭代次数的变化

Fig. 10 Variation in MSE with number of iterations

3.4 算法对实时性的改善

对 BOTDA 系统采集的时域波形进行 256 次累计平均,得到三维布里渊散射谱如图 11(a)所示, SNR 为 3.89 dB。采用所提算法降噪后,得到图 11(b)所示的降噪图像, SNR 为 13.37 dB, 细节良好、

轮廓鲜明。再对其进行 Lorentz 拟合,得到沿光纤的 BFS 分布如图 12 所示,加温处的 BFS 变化明显,且整体均值与图 5(b)所示的 10000 次累计平均相近。可见,所提算法对噪声覆盖严重的信号具有良好的提取效果。

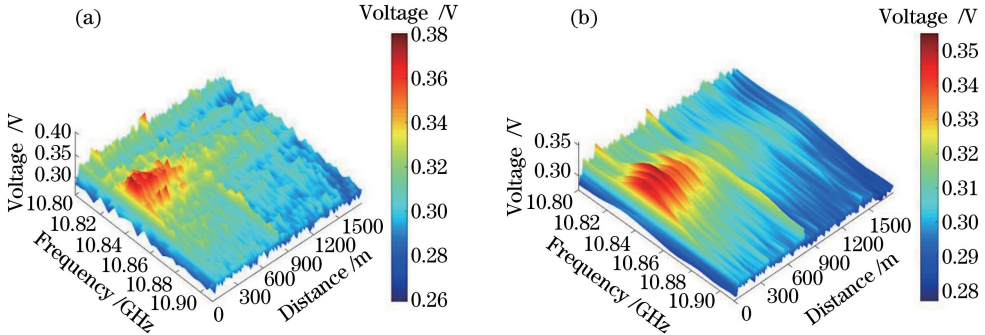


图 11 256 次平均的三维布里渊散射谱 TV 降噪结果对比。(a)降噪前;(b)降噪后

Fig. 11 Comparison of TV noise reduction results of 256-time average 3D Brillouin scattering spectrum.

(a) Before noise reduction; (b) after noise reduction

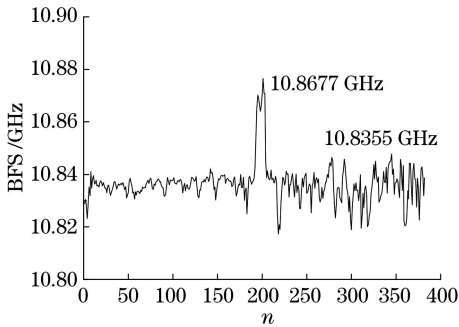


图 12 剔除欠拟合数据点的 BFS 分布

Fig. 12 BFS distribution after eliminating under-fitting data

累计平均次数是影响 BOTDA 实时性的主要因素,本文通过降噪算法提高信噪比,减少平均次数,改善了实时性。在 BOTDA 测量时间中,累计平均时间可以表示为 $t_{average} = N/f$,其中 N 为累计平均次数, f 为脉冲光频率。计算后可知,累计平均 256 次的时间是累计平均 10000 次的 2.56%,且

SNR 仅为 10000 次累计平均的 15.2%,而本文的降噪算法,可将该 SNR 提升至 52.3%。

4 结 论

将全变分图像降噪法应用于 BOTDA 系统信号的降噪处理,并采用最速下降法进行数值求解。为了优化求解速度,运用基于 Armijo 准则的回溯线搜索进行梯度下降步长的自适应调整。分析了拉格朗日因子对 BFS 提取准确度的影响。另外,与固定步长下降法对比发现,Armijo 线搜索对步长的优化可以大大减少迭代次数,缩短降噪处理的时间。对 256 次累计平均的 BOTDA 信号进行降噪处理和 BFS 提取结果分析发现,结合 Armijo 线搜索的 TV 图像降噪算法可以有效提高系统信噪比,相比于 10000 次的累计平均,可以大大减少数据采集时间,提高系统的实时性。但该算法设计依赖于数据的空

间光谱特征和噪声水平,信噪比提升范围有不确定性。如何根据不同的噪声类型及受噪声干扰的程度,对本文提出的算法进行改进,使之能更好地降噪并保持频谱细节,将是今后的研究方向之一。

参 考 文 献

- [1] Shang Q F, Hu Y T. Research progress of dynamic measurement technology based on Brillouin optical time-domain analysis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 100004.
尚秋峰, 胡雨婷. 基于布里渊光时域分析的动态测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 100004.
- [2] Bao X Y, Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, 11(4): 4152-4187.
- [3] Li C L. Research on the system of Brillouin optical fiber sensor based on multi-wavelength light source [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
李存磊. 基于多波长光源的布里渊光纤传感系统研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [4] Farahani M A, Colpitts B G, Castillo-Guerra E. Reduction of measurement time in BOTDA sensors using wavelet shrinkage [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7753: 77532E.
- [5] Farahani M A, Wylie M T V, Castillo-Guerra E, *et al.* Reduction in the number of averages required in BOTDA sensors using wavelet denoising techniques [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1134-1142.
- [6] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying Brillouin distributed fibre sensors using image processing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9634: 96342D.
- [7] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10870.
- [8] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Image and video denoising for distributed optical fibre sensors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10323: 103230K.
- [9] Meng Y J, Zha J F. Application of kuwahara filter in Brillouin optical time-domain analysis sensing image denoising [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070607.
孟彦杰, 查剑锋. Kuwahara 滤波在布里渊光时域分析传感图像去噪中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070607.
- [10] Meng Y J, Zha J F, Liu Y X. Intensifying the SNR of BOTDA using adaptive constrained least squares filtering [J]. *Optics Communications*, 2019, 437: 219-225.
- [11] Hou Y Q, Zhang H, Yang X L, *et al.* Research on total variational image restoration and comparison of three numerical methods [C] // The 2nd National Conference on Signal Processing and Application Conference, October 12, 2008, Nanning, Guangxi. [S. 1.]: China High-Tech Industrialization Association. 2008: 301-303.
侯榆青, 张欢, 杨旭朗, 等. 全变分图像复原的研究及其三种数值方法比较[C] // 全国第二届信号处理与应用学术会议论文集, 2018-10-12, 广西, 南宁. [S.1.]: 中国高科技产业化研究会, 2008: 301-303.
- [12] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, 60: 259-268.
- [13] Rudin L I, Osher S. Total variation based image restoration with free local constraints [C] // 1st International Conference on Image Processing, November 13-16, 1994, Austin, TX, USA. New York: IEEE, 1994: 31-35.
- [14] Vogel C R, Oman M E. Iterative methods for total variation denoising [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1996, 17(1): 227-238.
- [15] Li B, Li G. Armijo-based adaptive stability transformation method [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, 35(4): 399-407.
李彬, 李刚. 基于 Armijo 准则的自适应稳定转换法[J]. *计算力学学报*, 2018, 35(4): 399-407.