

文章编号: 1001-3806(2018)03-0346-05

瑞利 BOTDA 系统的 2 维提升小波降噪方法

刘 薇, 尚秋峰*

(华北电力大学 电子与通信工程系, 保定 071003)

摘要: 为了解决基于瑞利散射的布里渊光时域分析系统(BOTDA)中传感信号受噪声干扰严重的问题,采用 2 维提升小波变换算法,将测量信号从 1 维空间转换到 2 维空间,进行阈值降噪处理。通过理论分析和实验验证,取得了传统小波与 2 维提升小波降噪数据。结果表明,2 维提升小波变换比传统小波变换信噪比提高约 10dB,运算量减少了 1/3;2 维提升小波充分利用测量信号时间上的相关性,变换结构简单、运算速度快、降噪效果优于传统小波,适用于瑞利 BOTDA 系统降噪。该结果对光纤传感系统中信号降噪的研究有一定参考价值。

关键词: 光纤光学;信噪比;2 维提升小波;瑞利-布里渊光时域分析系统

中图分类号: TP212.9 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.03.011

2-D lifting wavelet de-noising method for Rayleigh BOTDA system

LIU Wei, SHANG Qiufeng

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to solve the problem that the sensor signal is seriously disturbed by noise in a Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) system based on Rayleigh scattering, the 2-D lifting wavelet transform algorithm was used to convert the measured signal from 1-D space to 2-D space, and the noise was reduced by threshold. Through the theoretical analysis and experimental verification, the traditional wavelet and 2-D lifting wavelet denoised data were obtained. The results show that the signal-to-noise ratio of the 2-D lifting wavelet transform is about 10dB higher than that of the traditional wavelet transform, and the computation amount is reduced by 1/3. The 2-D lifting wavelet makes full use of the time correlation of the measured signal, the transformation structure is simple, the operation speed is quick and the noise reduction effect is superior to the traditional wavelet. It is suitable for noise reduction in a Rayleigh BOTDA system. The results of this paper are of great reference to the research of signal denoising in optical fiber sensing systems.

Key words: fiber optics; signal-to-noise ratio; 2-D lifting wavelet; Rayleigh-Brillouin optical time domain analysis system

引 言

基于瑞利散射的布里渊光时域分析系统是一种单端布里渊光时域分析(Brillouin optical time-domain analysis, BOTDA)系统。通过在光纤同一端同时入射抽运脉冲光和连续光,将连续光的后向瑞利散射作为探测光,与相向传播的抽运脉冲光发生受激布里渊作用,实现光纤的分布式测量^[1]。单端入射的优点使得瑞利 BOTDA 系统在海底光缆、输电线路、桥梁等不便于

双端入射的大型结构中有广泛的应用前景。

在瑞利 BOTDA 系统中,通过扫描微波频率,得到一系列不同扫频信号下的布里渊时域信号,对光纤每个位置上的布里渊时域信号功率值进行洛伦兹拟合,得到 3 维布里渊信号增益谱,从而获得沿光纤的布里渊频移分布。瑞利散射光随着传感距离的增加呈指数式衰减,测量数据被多个噪声源污染,严重干扰信号的本质特征,使频谱无法较好拟合,造成布里渊频移测量误差,限制了传感距离。因此,有必要对测量信号进行降噪处理^[2-3]。

常规采用累加平均算法对测量信号降噪。累加平均法容易实现,但是计算时间长,需要较大的存储空间^[4]。小波变换^[5-16]、自适应滤波技术^[17]作为有效的降噪工具被广泛应用。参考文献[5]中将累加平均法和小波阈值法结合应用于 BOTDA 系统,在相同的测

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61377088);河北省自然科学基金资助项目(F2014502098)

作者简介:刘 薇(1993-),女,硕士研究生,主要从事光纤传感的研究。

* 通讯联系人。E-mail:lindashqf@126.com

收稿日期:2017-07-07;收到修改稿日期:2017-08-25

量精度下节省了 92% 的测量时间。参考文献[6]中讨论了布里渊光时域反射(Brillouin optical time-domain reflection, BOTDR)系统中小波阈值降噪的最优参量设置问题。参考文献[7]中根据陀螺信号噪声的宽频带特点,同时对小波分解高低频系数进行阈值处理,降噪效果优于传统阈值法。参考文献[10]中提出新的阈值函数,克服了硬阈值函数的伪吉布斯现象和软阈值函数的固定偏差。

上述算法均是在 1 维空间对每个扫描频率下数据降噪,只去除了测量信号在时间域的相关性,忽略不同扫描频率下的测量信号空间域的相关性。将测量信号的空间信息和时间信息相关联,以 2 维数组的形式保存,归一化映射到(0~255)后显示为灰度图像^[18-19],已有的各种图像处理技术均可以用于对 2 维测量信号降噪处理。本文中采用 2 维提升小波变换算法,将测量信号从 1 维空间转换到 2 维空间,进行阈值降噪处理。

1 基于提升格式的 2 维小波变换

1.1 2 维小波变换

2 维小波变换用同一组滤波器分别对行和列进行 1 维小波变换。首先对 2 维矩阵的每一行提升分解得到低频信息和高频信息,再对列分解,则 2 维矩阵经过一层小波变换分解为近似系数,水平细节系数,垂直细节系数和对角细节系数。多层 2 维小波分解需要对近似系数重复分解过程直到分解到指定层数。

小波变换的运算量由低通滤波器和高通滤波器的长度决定。令低通滤波器长度为 h ,高通滤波器长度为 g ,基于 MALLAT 算法的传统小波分解一层所需的运算量为 $C=2(h+g)+2$ 。设待分解原始信号的长度为 L ,进行 1 维 k 层小波分解所需的运算量为 $LC(1-2^{-k})$ 。进行 m 列 n 行($L=m \times n$) 2 维小波分解时,每列进行列变换所需计算量为 $nC(1-2^{-k})$,对于 m 列则为 $mnC(1-2^{-k})$ 。同理,行变换的计算量为 $mnC(1-2^{-k})$,总计算量为 $2mnC(1-2^{-k})$ 。2 维小波分解的计算量是 1 维小波分解的 2 倍。为了减少计算量,采用提升格式的 2 维小波变换。

1.2 提升格式

传统的小波变换以傅里叶变换为基础,通过对函数的伸缩平移实现多分辨率分析,被称为第 1 代小波变换。提升小波变换是对传统小波变换的改进,摆脱了傅里叶变换,避免了传统小波中基于卷积算法的冗余计算,可实现原位计算,对内存需求小。正反变换的架构完全相同,反变换只是正变换的逆向操作,算法

简单、速度快,适合并行处理,易于硬件实现,在信号处理领域有广阔的应用前景^[20]。

提升算法将小波变换过程分为分解、预测和更新。

(1) 分解。将输入的离散信号 $x[n]$ 按照奇偶性分解 $x_e[n]$ 和 $x_o[n]$ 两个子集,即:

$$\begin{cases} x_e[n] = x[2n] \\ x_o[n] = x[2n+1] \end{cases} \quad (1)$$

(2) 预测。利用信号 $x[n]$ 相邻采样点间具有相关性,可以通过偶数采样点预测奇数采样点,即 $x_o'[n] = F(x_e[n])$, F 为预测算子,预测误差作为小波系数:

$$d[n] = x_o[n] - x_o'[n] \quad (2)$$

(3) 更新。构造更新算子 U 与预测的小波系数 $d[n]$ 作用,叠加到原偶数序列 $x_e[n]$,得到原信号的近似,即尺度系数:

$$c[n] = x_e[n] + U(d[n]) \quad (3)$$

提升方案的重构过程与分解互逆。本文中选用系数简单的 bior2.2 小波函数,低通滤波器长度为 5,高通滤波器长度为 3。

基于提升格式的 bior2.2 小波对信号的分解重构表达式为:

$$\begin{cases} d(n) = s(2n+1) - \frac{1}{2}[s(2n) + s(2n+2)] \\ a(n) = s(2n) + \frac{1}{4}[d(n-1) + d(n)] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} s(2n) = a(n) - \frac{d(n-1) + d(n)}{4} \\ s(2n+1) = \frac{a(n) + a(n+1)}{2} - \frac{d(n-1) - 6d(n) + d(n+1)}{8} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $d(n)$ 是高频细节系数, $a(n)$ 是低频近似系数; $s(2n)$ 和 $s(2n+1)$ 是重构信号的偶数部分和奇数部分。

2 实验系统

搭建瑞利 BOTDA 实验系统如图 1 所示。采用中心波长为 1550.12nm、输出功率为 12.55dBm 的分布反馈式半导体激光器,由 50/50 的保偏耦合器(polarization maintaining coupler, PMC)分为两路。上支路光信号经 40dB 高消光比的电光调制器 1(electro-optical modulator, EOM) EOM₁ 调制, EOM₁ 射频口接脉冲信号源,偏置口接偏压控制器 1(maintain bias controller, MBC) MBC₁ 锁定在谷点,产生重复频率 38kHz、脉宽 100ns 的基频脉冲光。下支路光经 photline 马赫-曾德

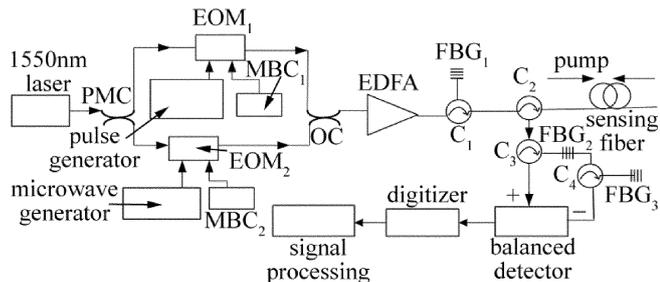


Fig. 1 Architecture of Rayleigh BOTDA system

尔电光调制器 EOM₂ 调制, EOM₂ 射频口接微波信号源, 控制其调制频率, 偏置口接偏压控制器 (MBC₂) 锁定在谷点产生抑制载波的 1 阶双边带连续光, 1 阶上边带波长为 1550.0411nm, 下边带波长为 1550.2149nm。脉冲光与连续光经过光耦合器 (optic-coupler, OC) 合成后, 经掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 放大、光栅 1 (fiber Bragg grating, FBG) FBG₁ 滤除自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 噪声后通过光环行器 C₂ 进入传感光纤。光栅 FBG₁ 的 3dB 带宽范围为 1550.026nm ~ 1550.276nm, 包含 1 阶双边带和 0 阶基带, 用于滤除放大后的 ASE 噪声; 光栅 FBG₂ 的 3dB 带宽范围为 1549.724nm ~ 1550.096nm, 只包含 1 阶上边带, 用于滤除基带和下边带; 光栅 FBG₃ 的 3dB 带宽范围为 1550.180nm ~ 1550.544nm, 包含 1 阶下边带, 用于滤除基带和上边带。

探测信号为脉冲基底 1 阶双边带的后向瑞利散射光, 包括斯托克斯光 (1 阶下边带) 和反斯托克斯光 (1 阶上边带), 与相向传输的脉冲基带信号发生受激布里渊散射作用后, 返回入射端携带受激布里渊散射信息的探测光, 经环形器 C₂ 入射到环形器 C₃, 通过 FBG₂ 反射出反斯托克斯边带, 经由环形器 C₃ 进入平衡检测器的负极; FBG₂ 透射的其它光成分通过环形器 C₄, 经过 FBG₃ 反射出斯托克斯边带进入平衡检测器的正极。平衡检测器输出差分信号由数据采集卡采集, 在计算机上进行信号处理。

3 信号降噪与结果分析

3.1 信号预处理

瑞利 BOTDA 系统检测光纤布里渊频移时, 通过扫描微波频率, 得到一系列不同扫描频率下的 1 维信号, 见下式:

$$\begin{cases} S_1 = f(\nu_1, z_i) \\ S_2 = f(\nu_2, z_i) \\ \vdots \\ S_m = f(\nu_m, z_i) \end{cases}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中, $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m$ 为扫描频率; z_1, z_2, \dots, z_n 为光纤位置; S_1, S_2, \dots, S_m 为扫描频率 $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m$ 下得到的 m 组 1 维信号。将 m 组 1 维信号按列存储, 得到 m 列 n 行的 2 维矩阵 M , 见下式:

$$M = \begin{bmatrix} f(\nu_1, z_0) & f(\nu_2, z_0) & \dots & f(\nu_m, z_0) \\ f(\nu_1, z_1) & f(\nu_2, z_1) & \dots & f(\nu_m, z_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(\nu_1, z_n) & f(\nu_2, z_n) & \dots & f(\nu_m, z_n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

设扫描频率步进为 Δf , 脉冲宽度和采样频率共同确定的光纤位置间隔为 Δz , 矩阵的行坐标 i 表示第 i 个光纤位置, 列坐标 j 表示第 j 个扫描频率, 则:

$$\begin{cases} i = \frac{z}{\Delta z} \\ j = \frac{\nu_j - \nu_1}{\Delta f} \end{cases} \quad (8)$$

在坐标为 (i, j) 位置处的元素值为在扫描频率 ν_j 下光纤 z 处的布里渊时域信号功率值 P , 即 $M((\nu_j - \nu_1)/\Delta f, z/\Delta z) = P$ 。2 维矩阵的列向量代表布里渊功

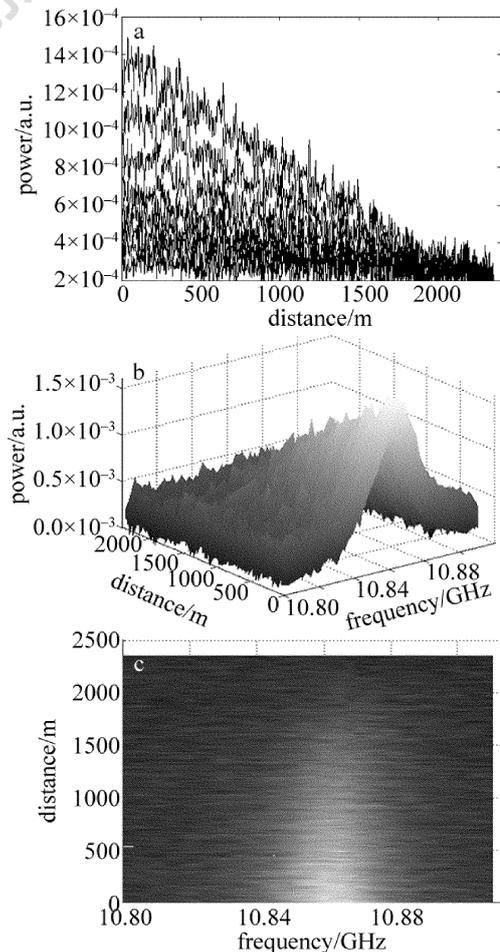


Fig. 2 a—measure signals at different scan frequencies b—3-D graph of measurement signals c—top view of 3-D figure

率值随光纤长度的分布,即实际测量信号,包含空间信息,行向量代表布里渊功率值随扫描频率的分布,即布里渊增益谱信号,包含时间信息。布里渊功率值与光纤长度和扫描频率间均存在非线性关系,即 2 维矩阵的行向量和列向量间均存在相关性。因此采用 2 维小波变换,可以同时去除行列向量的相关性,达到良好的降噪效果。

在 10.81GHz ~ 10.92GHz 范围内扫描微波频率,获得不同扫描下的测量曲线如图 2a 所示;结合布里渊功率与光纤长度、扫描频率的关系得到 3 维布里渊增益谱如图 2b 所示;3 维图的俯视图即为结合了测量信号空间信息和时间信息的 2 维矩阵,如图 2c 所示。

3.2 2 维提升小波阈值降噪

对上述预处理后的 2 维信号降噪步骤如下:(1)采用提升格式的双正交小波 bior2.2 对 2 维图像信号进行小波分解,得到近似系数和细节系数;(2)保留近似系数,对细节系数软阈值量化,得到新的阈值系数;(3)对阈值处理后的细节系数和最高分解层的近似系

数利用提升算法重构,得到降噪后的信号。

3.3 结果分析

采用 2 维提升小波阈值降噪后结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,降噪后测量曲线波动减小,图像更加光滑。

通过信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)和算法运算量指标将传统 1 维小波和 2 维提升小波降噪进行对比。分别在分解层数为 2 ~ 8 时计算传统 1 维小波和 2 维提升小波降噪信号的信噪比,如图 4 所示。

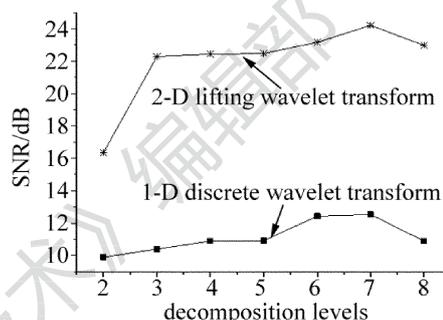


Fig. 4 Noise reduction effect under different decomposition layers

由图 4 可知,在分解层数为 2 ~ 7 时,随着分解层数增加,信噪比提高,当分解层数为 8 时,信噪比下降。这是因为分解层数过多时,低频域有用信号的特性被当作高频噪声滤除,实际信号丢失严重。2 维提升小波降噪和 1 维传统小波降噪相比,信噪比提高了 10dB 左右,降噪效果明显优于 1 维传统小波。

bior2.2 小波低通滤波器长度为 5,高通滤波器长度为 3。对 1 维信号基于 MALLAT 算法一层分解的运算量为 18,基于提升格式分解运算量为 6(见(4)式),2 维信号基于提升格式分解运算量为 12。因此 2 维提升分解比传统 1 维小波分解运算量减少了 1/3。

4 结 论

小波的提升方案避免了传统小波中基于卷积算法的冗余计算,算法简单、速度快;2 维小波变换能利用不同扫描频率下得到的测量信号间的相关性,降噪效果优于 1 维小波变换。本文中综合考虑降噪效果和计算量,采用 2 维提升小波变换对瑞利 BOTDA 系统的测量信号降噪处理,结果表明,和传统降噪方法相比,2 维提升小波降噪信号的信噪比提高 10dB 左右,减少 1/3 的运算量,适用于瑞利 BOTDA 系统降噪,该方法也适用于其它的光纤传感系统降噪。

参 考 文 献

[1] CUI Q S, PAMUKCU S, LIN A, et al. Distributed temperature sensing system based on rayleigh scattering BOTDA[J]. Sensors Journal

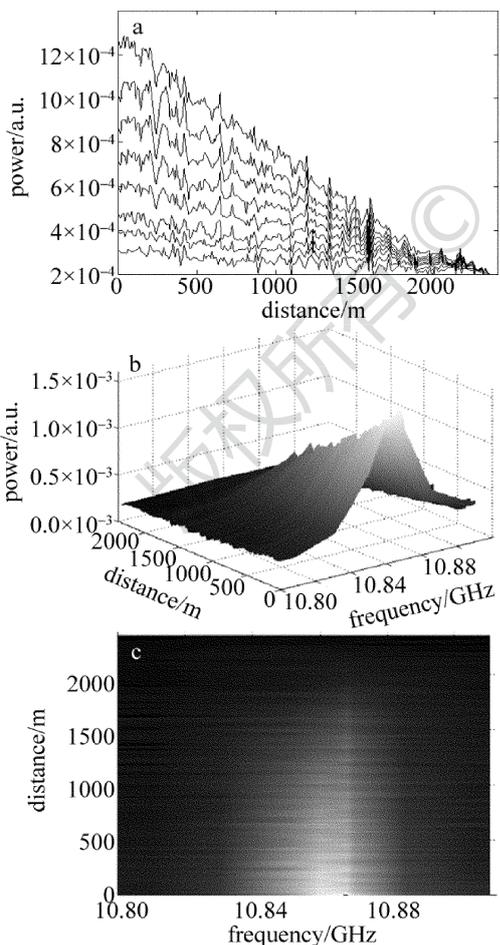


Fig. 3 a—denoised signals at different scan frequencies b—3-D graph of denoised signals c—top view of 3-D figure

- IEEE, 2011, 11(2):399-403.
- [2] ZHANG C, YU W F, XIA M, *et al.* Analysis of optical signal characteristics of optical fiber stimulated Brillouin scattering [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(3): 363-366(in Chinese).
- [3] WANG Y Q, HE J, MA Y, *et al.* Effect of random noise on measurement of marine Brillouin laser radar[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(1): 6-12(in Chinese).
- [4] DAKIN J P, PRATT D J, BIBBY G W, *et al.* Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(13):569-570.
- [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] KE T B, LIN L, LI Y Q, *et al.* Study on denoising method of time-domain reflected signal in Brillouin optical cable [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3): 311-315(in Chinese).
- [7] WANG W, XIANG Z, WANG Z D. Denoising for optic gyroscope based on wavelet full frequency-domain threshold processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3401-3405(in Chinese).
- [8] CHEN G, ZHU X F, XU Q Q, *et al.* Application of wavelet and sparse decomposition in discontinuous thin film denoising [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(4): 546-550(in Chinese).
- [9] QUAN Z, ZHANG B H. Application of an improved wavelet threshold algorithm in laser interrogation [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 218-224(in Chinese).
- [10] CHEN Y, CHENG Y, LIU H. Application of improved wavelet adaptive threshold de-noising algorithm in FBG demodulation [J]. *Optik—International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 132(3):243-248.
- [11] ZHAO L, LIU H, XU SH C, *et al.* Comparative study on the analysis of fiber vibration signals by HHT and CWT [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2): 260-264(in Chinese).
- [12] LIU L, YU M, YANG R J, *et al.* Wavelet de-noising for fiber Raman temperature sensing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0605005.
- [13] CHEN S Y, LIU J X, DING Y. Study on fusion method of infrared and X-ray image based on wavelet transform[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(5): 685-688(in Chinese).
- [14] ZHAO R, GU G H, YANG W. Implementation of visible light image based on polarization imaging [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(2): 227-231(in Chinese).
- [15] ZHAO L J, LI Y Q. Research on temperature feature extraction of BOTDR system based on wavelet transform [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2015, 52(1): 19-23(in Chinese).
- [16] CAI Z H, CHEN W J, ZHONG M. Application of several wavelets in 3-Dimensional surface survey [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(5): 610-616(in Chinese).
- [17] FARAHANI M A, CASTILLO-GUERRA E, COLPITTS B G. Acceleration of measurements in BOTDA sensors using adaptive linear prediction[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(1):263-272.
- [18] ZHAO SH Q, PANG F F, HE M T, *et al.* Study on signal processing of optical fiber coherent optical time domain reflectometer based on gray image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0305001(in Chinese).
- [19] SOTO M A, RAMI' REZ J A, THÉVENAZ L. Intensifying Brillouin distributed fibre sensors using image processing[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2015, 9634:96342D.
- [20] LIU A L. Dual filtering algorithm for infrared image based on lifting wavelet transform [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(4): 545-548(in Chinese).