

提升小波阈值联合累加平均的 BOTDR 系统降噪方案

王晨, 席丽霞*, 张阳安, 袁学光, 张晓光, 单丽楠, 肖振宇, 李璇

北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 针对自发布里渊散射信号微弱、系统信噪比低、导致系统传输距离短的问题,提出了一种基于提升小波阈值联合累加平均降噪的方案,增大了系统的测量距离。理论分析了自发布里渊散射信号特征,选择了合适的小波基、分解层数、阈值规则和阈值函数。搭建了实验平台,对所提方案的有效性进行了验证,并与仅累加平均降噪的结果和累加平均联合传统小波阈值降噪的结果进行了对比。结果表明,相比仅累加平均降噪法,本文提出的累加平均联合提升小波阈值降噪法将传感距离由 16.62 km 提升到了 39.45 km,而处理时间仅增加了 2.22 s,基本满足测量的实时性要求;与累加平均联合传统小波阈值降噪方法相比,本文算法将传感距离提升了 0.63 km,且处理时间减少了 0.69 s。因此,本文提出的方案更适用于长距离 BOTDR 系统。

关键词 光通信; 布里渊散射信号; 累加平均; 提升小波; 小波阈值降噪

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1706001

1 引言

布里渊光时域反射仪(BOTDR)是利用布里渊频移与温度和应变的线性关系来实现分布式光纤传感的技术,可用于大型基础设施(如电网、桥梁大坝等)的安全检测^[1-3],具有广阔的应用前景。然而自发布里渊散射信号本身很微弱,加上各种噪声的干扰,长距离测量时传感光纤末端的有用信号容易被淹没在噪声中,难以探测,从而限制了 BOTDR 系统的传感距离^[4-5]。同时,在高精度布里渊光时域反射仪传感系统中,测量的数据量庞大,实时性检测面临巨大的挑战^[6-7]。因此,提高 BOTDR 系统的信噪比和数据处理的实时性十分重要。

常见的降噪方法有累加平均降噪和小波阈值降噪。累加平均法是一种通过多次累加测量数据来提升信噪比的方法,曾被广泛应用于信号降噪处理中;但当累加次数达到一定数值后,信噪比提升速度明显变慢,而所需存储空间和测量时间依然线性增加,这不利于硬件实现,也无法满足测量实时性要求^[8]。小波变换具有良好的时频特性,适合分析非平稳信号,常用于信号降噪处理中^[9-11],如文献[12]中通过

分析海缆中 BOTDR 信号的特点,提出了小波阈值降噪法,该方法相比传统滤波法,信噪比增加,应变变化明显。但传统小波变换依赖傅里叶变换,需在频域中进行信号处理,时频转换耗时较长,导致系统的实时性降低。为了降低运算复杂度,避免传统小波中基于卷积算法的冗余运算,Daubechies 等^[13]提出了基于提升方案的小波变换,这是一种在时域中构造小波的全新方法。与传统小波变换相比,提升小波变换避免了傅里叶变换,可在时域上实现对双正交小波滤波器的构造^[14],结构简单,运算速度快,可实现原位计算,易于在硬件中实现,已在信号处理中得到广泛的应用。2017 年尚秋峰等^[15]将提升小波变换用于瑞利 BOTDA 系统降噪中,其降噪效果优于传统小波,且测量时间更短。2019 年 Tangudu 等^[16]在 BOTDR 系统应用了提升小波变换,在 50 km 传感范围内实现了 24 $\mu\epsilon$ 应变分辨率。然而,无论是小波阈值降噪还是提升小波阈值降噪,两者的降噪效果都严重依赖信号本身的特征及降噪算法参数的选择。对于信噪比很低的信号,小波阈值法或提升小波阈值法往往需要与其他方法结合才能达到最优的降噪效果。

收稿日期: 2020-12-02; **修回日期:** 2021-01-08; **录用日期:** 2021-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(61875247, 61527820)

通信作者: *xilixia@bupt.edu.cn

结合累加平均降噪性能好与提升小波变换速度快的优点,本文提出了提升小波阈值联合累加平均的降噪算法,用于 BOTDR 系统的信号降噪处理,并且通过实验进一步验证了所提方案的可行性。

2 基本原理

2.1 BOTDR 信号特点

传感光纤中产生的后向自发布里渊散射信号的功率会随传感距离增加而呈指数型衰减,理想的布里渊散射信号可表示为^[17]

$$P_s(L) = P_0 \exp(-2aL) a_B S \times \left(\frac{c}{n}\right) \times \frac{W}{2}, \quad (1)$$

式中: $n=1.46$ 为光纤纤芯的折射率; P_0 为探测脉冲的峰值功率; S 为布里渊散射的后向捕捉系数; $c=3 \times 10^8$ m/s 为真空中的光速; L 为光脉冲在光纤中的传输距离; a_B 和 a 分别为布里渊散射的损耗系数和光纤传输损耗系数; W 为脉冲宽度。

在 BOTDR 实验系统中,信号的产生、传输到接收的过程会引入一系列的噪声,如掺铒光纤放大器(EDFA)会引入自发辐射(ASE)噪声,光电探测器(PD)会引入热噪声与散粒噪声。通常情况下,本振光的功率 P_{LO} 远高于其他成分,故 P_{LO} 引起的散粒噪声在系统噪声中占主导,在忽略其他噪声的条件下,此时系统最大的信噪比 R_{SN} 可表示为

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{RP_s(L)}{q\Delta B}, \quad (2)$$

式中: R 为光电探测器的响应度; $P_s(L)$ 为布里渊后向散射功率; $q=1.6 \times 10^{-19}$ C 为电子电量; ΔB 为光电探测器带宽。

由(2)式可知,对于确定的系统,系统的信噪比 R_{SN} 与布里渊后向散射功率 $P_s(L)$ 成正比,即与探测脉冲光峰值功率 P_0 成正比,但过高的峰值功率会引起系统的非线性效应,导致系统测量精度降低。经查阅文献[18],在 BOTDR 系统中 20 km 的传感光纤和 100 ns 的光脉宽下,若使系统工作在自发布里渊散射状态,脉冲峰值功率需小于 100 mW。本文在 40 km 光纤和 500 ns 的光脉宽参数下,进行了多次实验测试,为保证 BOTDR 不发生非线性效应,入射光脉冲功率最大为 64 mW。

用仿真软件仿真了光纤位置 L 与布里渊信号功率 $P_s(L)$ 的关系,以及光纤位置 L 与信噪比(SNR, R_{SN})的关系,如图 1 所示。具体仿真参数如下:激光器波长 $\lambda=1550$ nm,脉宽 $W=500$ ns,脉冲光功率 $P_0=64$ mW,光纤长度 $L_{max}=40$ km,光纤损耗系数 $\alpha=0.2$ dB/km,布里渊散射损耗系数 $\alpha_B=1.23 \times 10^{-6}$ m⁻¹,后向捕捉系数 $S=1.45 \times 10^{-3}$,光电探测器响应度 $R=0.85$ A/W,光电探测器带宽 $\Delta B=20$ GHz。

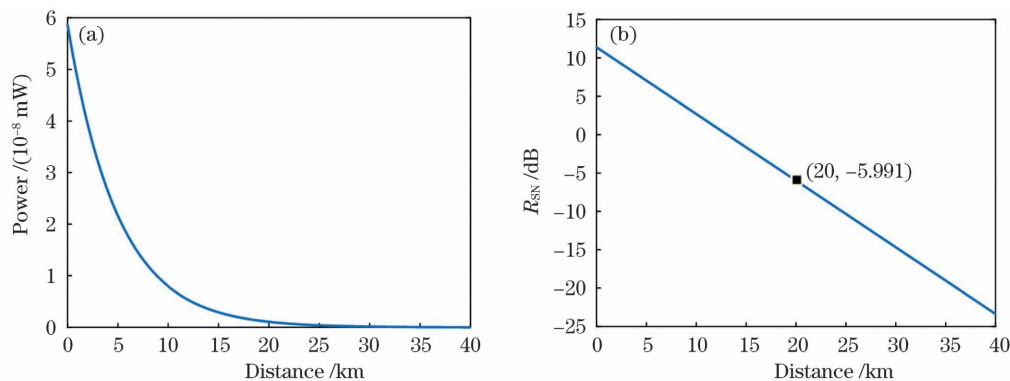


图 1 布里渊信号功率 $P_s(L)$ 和信噪比 R_{SN} 随光纤位置 L 的变化。(a)不同位置处的布里渊信号功率;(b) $P_0=64$ mW 不同位置处的信噪比

Fig. 1 Variation of Brillouin signal power $P_s(L)$ and signal-to-noise ratio with fiber position L . (a) Brillouin signal power at different positions; (b) SNR at different positions when $P_0=64$ mW

由图 1(a)可以看出,布里渊信号功率随测量距离的增加呈指数型衰减,当距离超过 20 km 时,其布里渊信号十分微弱。根据图 1(b),可知随系统传感距离 L 的增加, R_{SN} 呈线性下降,且在 20 km 的光纤处信噪比约为 -6 dB,此时需要采用降噪算法来进行信号的解调。

2.2 提升小波阈值降噪原理

提升小波变换的基本思想是:将现有小波滤波器分解为基本构造模块^[15],分步完成小波变换,其过程主要分为以下三个步骤:分解、预测和更新。

1) 分解。将输入的离散信号 $x[n]$ 按奇偶性分为两个互不正交的奇、偶序列:

$$x_e[n] = x[2n], x_o[n] = x[2n + 1]。 \quad (3)$$

2) 预测。利用信号 $x[n]$ 相邻采样点之间的相关性, 构造预测算子 P , 用偶序列来预测奇序列, 并将预测误差 $d[n]$ 作为小波系数, 即高频系数, 其表达式为

$$d[n] = x_o[n] - P(x_e[n])。 \quad (4)$$

3) 更新。构造更新算子 U , 在预测误差 $d[n]$ 基础上更新 $x_e[n]$, 并将 $c[n]$ 作为尺度系数, 即低频系数, 其表达式为

$$c[n] = x_e[n] + U(d[n])。 \quad (5)$$

因为提升小波的正、反变换架构完全相同, 变换过程互逆, 即反变换过程为恢复更新、恢复预测和奇偶合并三个步骤, 对应公式为

$$x_e[n] = c[n] - U(d[n])， \quad (6)$$

$$x_o[n] = d[n] + P(x_e[n])， \quad (7)$$

$$x[n] = x_o[n] + x_e[n]。 \quad (8)$$

因提升小波结构简单、正反变换互逆, 可有效降低计算复杂度, 缩短信号处理时间, 故提升小波变换是一种快速的小波构造方法。

与传统小波阈值降噪法相似, 提升小波阈值降噪法也分为三个步骤, 具体流程如图 2。

2.3 提升小波阈值降噪最优参量的选取

对于不同的信号, 提升小波阈值降噪法需要选择不同的小波基函数、分解层数、阈值规则和阈值函数, 而且这些参数的选择没有统一的标准, 必须根据实际信号的特点进行多次测试, 最终确定一组最佳的降噪参数。本文使用信噪比 R_{SN} 作为降噪效果的衡量指标, 研究布里渊散射信号在不同小波基函数、分解层数、阈值规则及阈值函数下的降噪效果。

2.3.1 小波基函数选取

因为不同小波基函数的正则性、对称性及紧支性等特性不同, 对同一信号选择不同的小波基函数, 其降噪效果也不同。常用的提升小波系数有

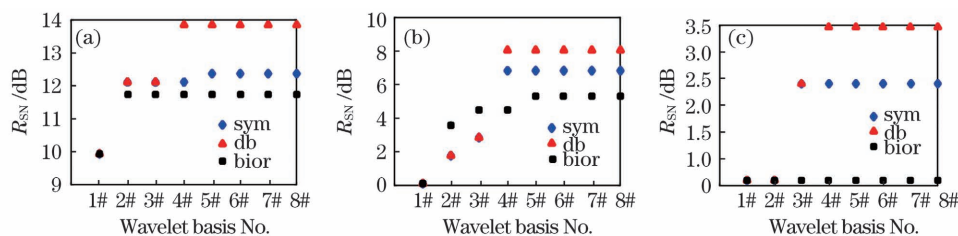


图 3 不同信噪比下的最优小波基。(a) $R_{SN} = -6$ dB; (b) $R_{SN} = -15$ dB; (c) $R_{SN} = -20$ dB

Fig. 3 Optimal wavelet basis under different signal-to-noise ratios. (a) $R_{SN} = -6$ dB; (b) $R_{SN} = -15$ dB; (c) $R_{SN} = -20$ dB

2.3.2 分解层数及阈值选取规则

分解层数和阈值选取也会影响小波降噪效果,

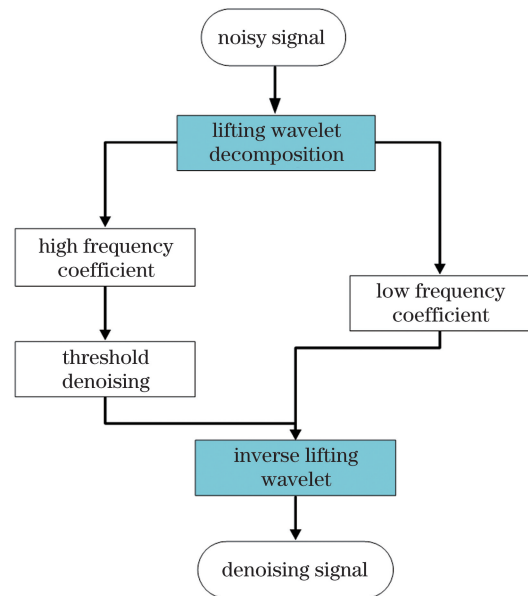


图 2 提升小波阈值降噪流程图

Fig. 2 Flow chart of lifting wavelet threshold denoising
Symlets (sym) 小波, Daubechies (db) 小波和 Biorthogonal(bior)小波, 针对这 3 种小波分别选取 8 种小波基函数 (1# ~ 8#), 即 {sym1, sym2, sym3, sym4, sym5, sym6, sym7, sym8, db1, db2, db3, db4, db5, db6, db7, db8, bior1.1, bior1.3, bior1.5, bior2.2, bior2.4, bior2.6, bior2.8, bior3.5}。为寻找最佳的提升小波基函数, 本文选取不同小波基在同一分解层数下, 对不同信噪比下的仿真 BOTDR 信号进行降噪处理。如图 3 所示, 在系统信噪比 $R_{SN} = -6$ dB, $R_{SN} = -15$ dB, $R_{SN} = -20$ dB, 分解层数为 7 时, 比较不同提升小波基的降噪效果。

由图 3 可知, 对于不同信噪比下的信号, 相比 sym 小波和 bior 小波, 当小波基为 db4、db5、db6、db7、db8 时, 系统信噪比 R_{SN} 相同且最大。这是因为 dbN 小波中 N 越大代表消失矩越高, 光滑性越好, 但此时会导致计算量增加。故在相同降噪效果的要求下, 本文选用 db4 作为提升小波基函数。

若分解层数过少或阈值设定过小, 噪声去除不完全, 降噪效果不理想; 若分解层数过多或阈值设定过大,

对各层小波系数进行阈值处理,会导致部分真实信号被视为噪声而去除,造成有效信息丢失。因此选择合适的分解层数和阈值十分必要,通常分解层数选取 3 到 10 层。阈值的选取规则主要有 4 种:固定阈值(Sqtwolog)、无偏似然估计阈值(Rigrsure)、启发式阈值(Heursure)和极大极小阈值(Minimaxi)规则^[15]。其中: Sqtwolog 规则采用固定阈值; Rigrsure 规则通过计算给定阈值的似然估计,将其最小化以获得所选阈值; Heursure 规则结合前两种

阈值规则的优点,常用于信噪比很低的场景; Minimaxi 规则也是一种固定阈值,可在一个给定的函数集内实现最大均方误差最小化^[12]。

图 4 表示 3 种不同信噪比下的信号在小波基为 db4,软阈值函数条件下不同分解层数和阈值规则的降噪效果。从图 4 可知,在分解层数为 7 或 8 时,固定阈值 Sqtwolog 和启发式阈值 Heursure 规则的信噪比最大,此时降噪效果最佳。考虑到分解层数越大,计算复杂度越高,本文采用分解层数为 7。

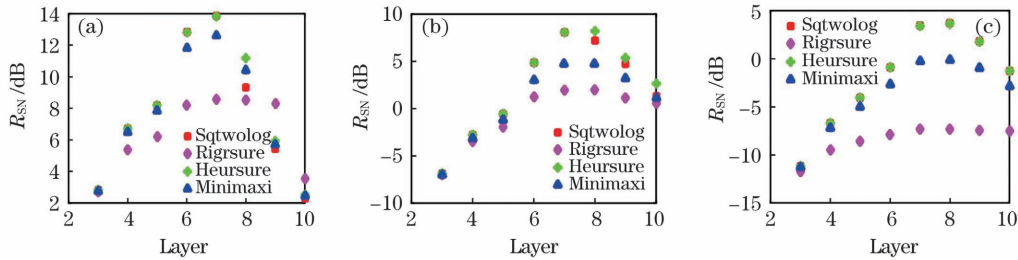


图 4 不同信噪比下的最优阈值规则和分解层数。(a) $R_{SN} = -6$ dB; (b) $R_{SN} = -15$ dB; (c) $R_{SN} = -20$ dB

Fig. 4 Optimal threshold rules and decomposition layers under different signal-to-noise ratios. (a) $R_{SN} = -6$ dB; (b) $R_{SN} = -15$ dB; (c) $R_{SN} = -20$ dB

2.3.3 最优阈值函数的选取

阈值的处理方法主要分为硬阈值函数和软阈值函数两种,其区别在于对绝对值大于设定阈值的小波系数的操作不同^[19],即:硬阈值法是将小波分解系数中绝对值大于阈值的小波系数保持不变;而软阈值法是将小波分解系数中绝对值大于阈值的小波系数迭代为该小波系数与阈值的差值。相同之处在于:两种阈值函数对绝对值小于设定阈值的小波系

数均采取置 0 操作^[20]。

为了进一步探究阈值规则与阈值函数对降噪效果的影响,在小波基为 db4 和分解层数为 7 时,对比 3 种不同信噪比下 BOTDR 信号在 4 种阈值选取规则和两种阈值函数下的降噪效果,如表 1 所示,可知在 4 种阈值规则中,信号的软阈值降噪效果均优于硬阈值降噪效果,且当阈值规则为 Sqtwolog,处理方法为软阈值函数时,系统的信噪比最大。

表 1 不同阈值规则和阈值函数下的降噪效果

Table 1 Noise reduction without threshold rule and threshold function

Threshold rule	$R_{SN} = -6$ dB		$R_{SN} = -15$ dB		$R_{SN} = -20$ dB	
	Hard function	Soft function	Hard function	Soft function	Hard function	Soft function
Sqtwolog	12.85	13.85	8.07	8.09	3.69	3.70
Rigrsure	1.77	8.57	-6.37	1.93	-14.12	-7.35
Heursure	11.77	13.83	8.07	8.08	-1.51	3.42
Minimaxi	2.77	12.61	-7.92	4.82	-12.25	-0.25

综上可知,通过探究 3 种不同信噪比下仿真 BOTDR 信号的降噪最优参量,本文选取小波阈值降噪最优参数为小波基为 db4,分解层数为 7,阈值规则为 Sqtwolog,软阈值函数。

2.4 5 种降噪算法的性能对比与分析

在确定了小波阈值最佳降噪参数后,对比分析系统信噪比为 $R_{SN} = -6$ dB 的仿真信号分别在累加平均、小波阈值降噪、提升小波阈值降噪、累加平均

联合小波阈值降噪及累加平均联合提升小波阈值降噪 5 种降噪方案下的降噪性能,5 种降噪方案对应的信号降噪算法流程如图 5 所示。

表 2 给出了在系统信噪比 $R_{SN} = -6$ dB 的情况下,5 种降噪方案的降噪效果,这里增加了一组单独采用累加平均次数为 1000 次的降噪效果作对比,表中 RMSE 表示均方根误差。由表 2 可知,1)累加平均次数越高,降噪效果越好,但时间也随之增加,不

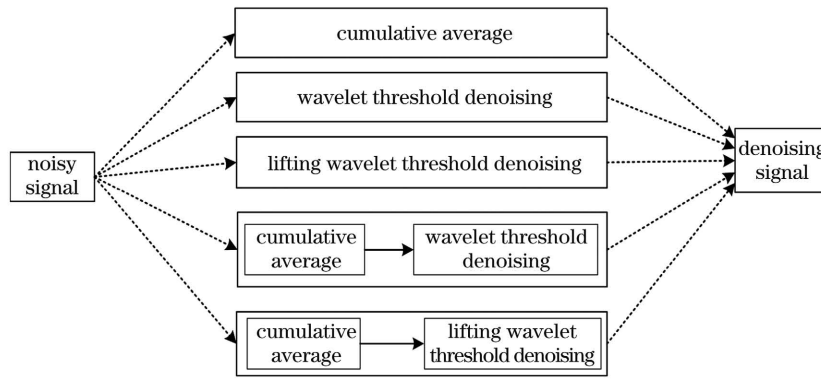


图 5 降噪算法流程框图

Fig. 5 Flow chart of noise reduction algorithm

表 2 不同算法的降噪效果

Table 2 Noise reduction effect of different noise reduction algorithms

Algorithm	SNR /dB	RMSE	Time /ms
Cumulative average ($N = 5000$)	21.71	0.12	486.22
Wavelet	11.78	0.42	9.05
Lifting wavelet	13.85	0.32	8.20
Cumulative average ($N = 1000$) + wavelet	25.62	0.07	109.38
Cumulative average ($N = 1000$) + lifting wavelet	27.52	0.06	108.15
Cumulative average ($N = 1000$)	14.82	0.26	103.87

适用于对实时性要求高的系统;2)低累加次数(如表中 1000 次)的累加平均降噪算法与单独小波阈值降噪和提升小波阈值的降噪效果相差不大,但高次数累加平均降噪效果优于单独的传统小波与提升小波的降噪效果;3)两种联合降噪算法的降噪效果均优于单独使用一种降噪方案的效果,在缩短处理时间的同时,信噪比得到了更好的提升;4)提升小波降噪效果优于传统小波,联合累加平均后的效果亦优于传统小波联合累加平均降噪法,且处理速度更

快。因此,在后面的实验验证中,将采用提升小波阈值联合累加平均的降噪方案。

3 分析与讨论

搭建如图 6 所示的 BOTDR 实验系统,激光器(Laser)输出的连续光经 20 : 80 的保偏耦合器(PMC)分为两路,其中:80%的光信号注入电光调制器 1(EOM1)被调制为脉冲光后,经脉冲掺铒光纤放大器(P-EDFA)放大、光纤光栅(FBG1)滤噪,

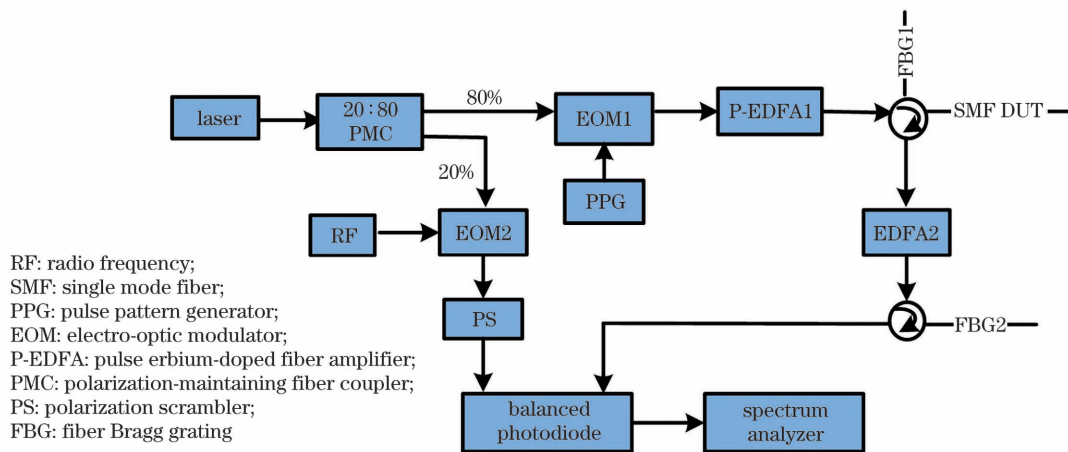


图 6 BOTDR 实验系统框图

Fig. 6 Schematic diagram of the BOTDR system

并通过环形器注入待测光纤,产生后向布里渊散射信号;20%的光进入电光调制器 2(EOM2)后经射频源(RF)调制产生频移边带,其中两个 1 阶边带为具有布里渊频移的参考光,经扰偏器(PS)后为本振参考光。布里渊散射光与本振参考光分别进入平衡探测器(Balanced Photodiode)进行光电转换,最后由频谱仪(Spectrum Analyzer)采集信号。

实验中采用 20 km + 20 km 两段不同频移的待测光纤,在室温下进行操作。设置扫频范围为 1.576~1.821 GHz,扫频间隔为 2 MHz,微波射频源频率调为 11 GHz。考虑到测量准实时性的要求,本研究采集了 1000 次实验信号进行累加平均处理。对比了 3 种处理方法下得到的沿光纤的布里渊频移分布图,如图 7 所示,(a)为仅 1000 次累加平均,(b)为 1000 次累加平均联合传统小波阈值降噪,(c)为 1000 次累加平均联合提升小波阈值降噪。

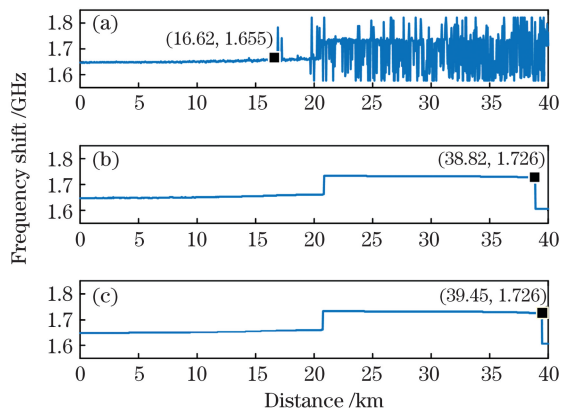


图 7 沿光纤长度分布的布里渊频移。(a)只累加平均降噪;(b)累加平均+小波阈值降噪;(c)累加平均+提升小波阈值降噪

Fig. 7 Brillouin frequency shift distribution along the fiber length. (a) Cumulative average; (b) cumulative average + wavelet threshold denoising; (c) cumulative average + lifting wavelet threshold denoising

由图 7 可以看出,仅累加平均降噪时,最长探测距离约为 16.62 km,之后频移抖动严重;累加平均联合传统小波阈值降噪法可探测到的传感距离为 38.82 km;累加平均联合提升小波降噪频移曲线较平滑,最大传感距离为 39.45 km,基本可以实现 40 km 的探测目标。相比仅累加平均传感距离提升了 22.83 km,相比累加平均结合传统小波提升了 0.63 km。同时在累加平均 1000 次基础上,传统小波阈值降噪处理时间为 2.91 s,而提升小波阈值降噪的处理时间为 2.22 s,仅为累加平均结合传统小

波方案的 76%,计算速度更快,降噪效果更佳,更适用于长距离 BOTDR 系统。

4 结 论

根据 BOTDR 信号特点,以信噪比为降噪性能的评价指标,通过仿真选取了合适的提升小波阈值降噪参数,并对比了累加平均、传统小波阈值降噪、提升小波阈值降噪、传统小波阈值联合累加平均及提升小波阈值联合累加平均降噪 5 种方案的降噪效果。搭建实验平台,验证了提升小波阈值联合累加平均降噪方案的可行性。结果表明,采用 1000 次累加平均联合提升小波降噪方案,可将传感距离由仅 1000 次累加平均的 16.62 km 提升至 39.45 km,处理时间仅增加了 2.22 s,基本满足系统的实时性要求。与累加平均联合传统小波降噪法相比,文中提出的方案可实现的传感距离更长,处理时间更短。因此,本文所提出的累加平均联合提升小波阈值降噪的方案在 BOTDR 信号的降噪处理过程中具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Bai Q, Wang Q L, Wang D, et al. Recent advances in Brillouin optical time domain reflectometry [J]. *Sensors*, 2019, 19(8): E1862.
- [2] Zhang X P, Wang F, Lu Y G. Fully distributed optical fiber sensor based on Brillouin effect [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(11): 14-20.
张旭苹, 王峰, 路元刚. 基于布里渊效应的连续分布式光纤传感技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(11): 14-20.
- [3] Xia M, Tang X H, Wang Y, et al. Comparative analysis of strain monitoring of the installed optical fiber composite overhead ground wire using BOTDA/R [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1506001.
夏猛, 汤晓惠, 王颖, 等. 基于 BOTDA/R 的在运光纤复合架空地线光缆应变监测对比分析 [J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1506001.
- [4] Chang T Y, Kosciela T E, Li D Y, et al. A novel detection method of Brillouin backscattered light in optical fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(4): 430-434.
- [5] Wang J J, Li Y Q. Review of methods for improving performance of Brillouin optical time-domain analysis system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110003.
王健健, 李永倩. 布里渊光时域分析系统性能提高方法综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11):

- 110003.
- [6] Zhou D W, Wang B Z, Ba D X, et al. Fast distributed Brillouin optical fiber sensing for dynamic strain measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328005.
周登望, 王本章, 巴德欣, 等. 用于动态应变测量的快速分布式布里渊光纤传感[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328005.
- [7] Bao Y B, Sun J Q, Huang Q. Distributed fiber sensor based on Brillouin optical time domain reflection technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 210002.
包宇奔, 孙军强, 黄强. 布里渊光时域反射仪分布式光纤传感研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 210002.
- [8] Cheng B Z, Wang D, Wang Y, et al. Research on improving real-time performance of R-OTDR system [J]. *Optical Technique*, 2019, 45(6): 701-706.
程碧钊, 王东, 王宇, 等. 提升 R-OTDR 系统实时性能方法研究[J]. *光学技术*, 2019, 45(6): 701-706.
- [9] Liu L, Yu M, Yang R J, et al. Wavelet denoising applied in optical fiber Raman temperature sensor system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0605005.
刘磊, 于淼, 杨瑞娟, 等. 小波去噪用于光纤拉曼温度传感系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0605005.
- [10] Sha Y Y, Xi L X, Zhang X G, et al. Polarization mode dispersion measurement based on wavelet threshold denoising[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1106006.
沙宇洋, 席丽霞, 张晓光, 等. 基于小波阈值去噪的偏振模色散测量[J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1106006.
- [11] Zhang J Y, Ren J J, Chen S H, et al. Application of wavelet denoising in terahertz nondestructive detection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0114001.
张霁旸, 任姣姣, 陈思宏, 等. 小波去噪在太赫兹无损检测中的应用[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0114001.
- [12] Ke T B, Lin L, Li Y Q, et al. Study on denoising method of Brillouin optical time domain reflectometry signal of submarine cable [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3): 311-315.
柯天兵, 林琳, 李永倩, 等. 海缆布里渊光时域反射信号的去噪方法研究[J]. *激光技术*, 2014, 38(3): 311-315.
- [13] Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. *Journal of Fourier Analysis and Applications*, 1998, 4(3): 247-269.
- [14] Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets [J]. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 1998, 29(2): 511-546.
- [15] Shang Q F, Liu W. New wavelet de-noising method for Rayleigh BOTDA system [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(6): 916-920.
尚秋峰, 刘薇. 瑞利 BOTDA 系统小波降噪新方法[J]. *半导体光电*, 2017, 38(6): 916-920.
- [16] Tangudu R, Sahu P K. An efficient BOTDR based DSS system[C]//*Optical Sensors 2019*, June 25-27, 2019, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2019: JTh2A. 8.
- [17] Li Y Q, Zhang L X, Li X J, et al. Performance improvement method of Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0106001.
李永倩, 张立欣, 李晓娟, 等. 瑞利布里渊光时域分析系统传感性能的提升方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0106001.
- [18] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P, et al. Influence of modulation instability on distributed optical fiber sensors based on spontaneous Brillouin scattering [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(6): 1156-1160.
- [19] Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1006005.
王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1006005.
- [20] Liu X J, Yuan B X, Lu H, et al. Segmented wavelet de-noising algorithm based on improved threshold function for optical fiber sensing [J]. *Optical Technique*, 2020, 46(1): 83-88, 109.
刘学君, 袁碧贤, 卢浩, 等. 基于改进阈值函数的光纤分段小波去噪算法[J]. *光学技术*, 2020, 46(1): 83-88, 109.

Denoising Scheme of BOTDR System Using the Combination of Lifting Wavelet Threshold and Cumulative Average

Wang Chen, Xi Lixia^{*}, Zhang Yang'an, Yuan Xueguang, Zhang Xiaoguang,
Shan Linan, Xiao Zhenyu, Li Xuan

*State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and
Telecommunications, Beijing 100876, China*

Abstract

Objective Brillouin optical time-domain reflectometer (BOTDR) is employed in numerous fields with practical applications owing to its various advantages such as measuring multiple physical parameters, long sensing distance, and single-end measurement. However, Brillouin backscattered signals become weak along the fibers. Moreover, noises can be introduced by optical or electrical components in the BOTDR system, resulting in poor signal-to-noise ratio (SNR) as well as difficulty in accurately measuring the Brillouin frequency shift for long fiber, which limits the transmission distance. Reducing noise to enhance SNR is an essential for solving the problem. Traditional denoising methods include cumulative average denoising, traditional wavelet threshold denoising, and lifting wavelet threshold denoising. The cumulative average denoising method has limitations such as the time of accumulation and the storage capacity of the hardware. Meanwhile, whether traditional wavelet threshold denoising or lifting wavelet threshold denoising, they depend heavily on the characteristics of the signal and choice of parameters, such as the wavelet basis, wavelet decomposition layer, threshold rule, and threshold function. Therefore, for low SNR signals, these two methods are combined with other methods to achieve the expected denoising results. Considering the good denoising performance of the cumulative average method and the short denoising time of lifting wavelet transform, a novel denoising scheme combining both lifting wavelet threshold and the cumulative average is proposed to improve the measurement distance.

Methods A denoising method for the BOTDR system that combines the lifting wavelet threshold with cumulative average is presented. The characteristics of spontaneous Brillouin scattering signals are analyzed. Then, we introduce the principle of lifting wavelet transform and discuss its denoising flowchart (Fig. 2). Furthermore, the parameters of the wavelet threshold denoising suitable for the BOTDR signal are analyzed and optimized through simulations. This paper compares the effectiveness of five denoising schemes (Fig. 5), which are cumulative average denoising, traditional wavelet threshold denoising, lifting wavelet threshold denoising, combined scheme of both traditional wavelet threshold and cumulative average denoising, and a combined scheme of both lifting wavelet threshold and cumulative average denoising. Finally, an experimental platform is built (Fig. 6) and the effectiveness of the proposed method is verified. In addition, the measurement results for the proposed method are compared with other denoising methods.

Results and Discussions The combination of lifting wavelet threshold and cumulative average denoising exerts higher SNR, shorter running time, and longer sensing distance than other denoising methods. Simulations and experiments are performed on two methods to verify the effectiveness of the proposed scheme. Brillouin signal power and SNR are replaced with transmission distance and are obtained from simulations (Fig. 1). The wavelet threshold denoising parameters are explored and discussed for different SNR scenarios (Fig. 3 & Fig. 4 & Table 1), which show the universality of the selected parameters. The optimal parameters for wavelet threshold denoising are obtained, including wavelet threshold denoising of db4, decomposition levels of 7, the threshold rule of Sqtwolog, and soft threshold function. The effectiveness of the five denoising schemes is compared, as shown in Table 2. The schemes combining two denoising algorithms show a better noise reduction effect than the others with one algorithm. Also, the SNR was improved greatly while the processing time reduced. Moreover, denoising using the lifting wavelet is better than that using the traditional wavelet. After combining the method of cumulative average noise reduction, the denoising and processing speed of the lifting wavelet remain better. The experimental platform is built to verify the reliability of the proposed scheme (Fig. 6). The results show that, compared with the simple cumulative average method, the proposed method improves the sensing distance from 16.22 km to 39.45 km, while processing time only increases 2.22 s. Also, when compared with the method of combining wavelet threshold with

cumulative average denoising, the proposed method has a 0.63 km improvement in sensing distance and 0.69 s better in processing time reduction (Fig. 7).

Conclusions A novel denoising scheme that combines lifting wavelet threshold with cumulative average is proposed to further improve the measurement distance. Combining lifting wavelet threshold with cumulative average denoising exerts higher SNR, shorter run time than the other four schemes of cumulative average denoising, traditional wavelet threshold denoising, lifting wavelet threshold denoising, combination of traditional wavelet threshold and cumulative average denoising. The reliability of the proposed scheme is verified by the experimental platform. Therefore, this study serves as an important reference for exploring noise reduction of Brillouin scattering signal.

Key words optical communications; Brillouin scattering signal; cumulative average; lifting wavelet; wavelet threshold denoising

OCIS codes 060.2370; 060.4510; 290.5830