

激光与光电子学进展

基于 FPGA 的分布式拉曼光纤传感系统

刘恒¹, 喻俊松¹, 万生鹏^{1,2*}, 董德壮¹, 熊新中¹, 尹玺¹, 肖登¹

¹南昌航空大学江西省光电检测技术工程实验室, 江西 南昌 330063;

²南昌航空大学无损检测与光电传感技术及应用国家地方联合工程实验室, 江西 南昌 330063

摘要 提出了一套基于现场可编程门阵列(FPGA)的分布式拉曼光纤传感系统,实现了信号的采集、传输、处理。为了提高系统的信噪比(SNR),提出了基于FPGA的累加迭代平均滤波算法和非线性小波变换阈值去噪法。首先对放大之后的斯托克斯光和反斯托克斯光信号进行累加迭代,然后再平均,经过8000次累加迭代平均之后,系统信噪比提高了36.748 dB。之后解调出温度,对温度信息再进行非线性小波变换阈值去噪,最后经过加热实验验证,系统的测温精度为 ± 1.5 °C左右。

关键词 光纤光学; 拉曼; 现场可编程门阵列; 累加迭代平均; 非线性小波变换阈值去噪

中图分类号 TP312; O436.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0506006

Distributed Raman Optical Fiber Sensing System Based on FPGA

Liu Heng¹, Yu Junsong¹, Wan Shengpeng^{1,2*}, Dong Dezhuang¹, Xiong Xinzhong¹, Yin Xi¹,
Xiao Deng¹

¹Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University,
Nanchang, Jiangxi 330063, China;

²National Engineering Laboratory for Nondestructive Testing and Optoelectric Sensing Technology and Application,
Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract A distributed Raman optic fiber sensing system based on field programmable gate array (FPGA) is proposed, which realizes signal acquisition, transmission, and processing. A cumulative iterative average filtering algorithm based on FPGA and a nonlinear wavelet transform threshold denoising method are proposed to improve the signal-to-noise ratio (SNR) of the system. First, the amplified Stokes and anti-Stokes signals are accumulated iteratively and then averaged. After averaging of 8000 cumulative iterations, the SNR of the system is improved by 36.748 dB. Then the temperature is demodulated, and the temperature information is denoised by nonlinear wavelet transform threshold. Finally, the accuracy of the proposed system's temperature measurement is ± 1.5 °C from the heating experiment.

Key words fiber optics; Raman; field programmable gate array; cumulative iterative average; nonlinear wavelet transform threshold denoising

OCIS codes 060.2300; 110.7410; 140.3510; 280.4788

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-08-13; 录用日期: 2020-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(61465009)、江西省主要学科学术和技术带头人资助计划(20172BCB22012)、江西省自然科学基金重点项目(20202ACBL202002)

*E-mail: sp.wan@163.com

1 引言

近年来,分布式光纤由于所具有的独特优势,在越来越多的场合中被应用,例如石油化工^[1]、桥梁、隧道、航空航天、核电站泄漏监测^[2]、电力监测^[3]、火灾预警^[4-6]等。与传统的电学传感器相比,分布式光纤温度传感器在实现对温度进行分布式测量同时,可以不受电磁干扰^[7-11],且光纤体积小^[12],耐高温,易于安装在石油管道、地铁隧道里,因此分布式光纤测温系统具有很大的实用性^[13]。

对于分布式光纤拉曼测温系统,自发后向拉曼散射光的强度十分微弱^[14-16],仅为入射光强度的 10^{-9} ,且随着光纤距离的增加会逐渐衰减。激光器、光电探测器等在工作时会产生大量随机噪声,这就使得有用的信号会淹没在噪声里,这些因素导致分布式光纤拉曼测温系统普遍存在测温精度低、可探测距离短等缺点^[17],因此信号处理技术对分布式光纤拉曼测温系统起着至关重要的作用。

目前的分布式光纤拉曼测温系统普遍只使用一种或两种去噪方法对信号进行简单的去噪,在采集到信号之后,不通过硬件进行处理,直接传输到上位机进行卡尔曼滤波^[18]或小波变换^[19]去噪,缺点是信号在传输过程中会掺杂更多噪声,并且用软件进行累加平均去噪会增加系统的响应时间,影响测温的实时性。基于此,本文提出了基于现场可编程门阵列(FPGA)的累加迭代平均滤波算法和非线性小波变换阈值去噪法。FPGA设计灵活,具有强大的高速采集能力,非常适合用来采集和存储大量数据^[20-24]。FPGA采集到两路斯托克斯光和反斯托克斯光之后,通过硬件累加迭代平均滤波算法来减弱噪声对系统的影响,在上位机接收到数据后,再通过软件进行非线性小波变换阈值去噪,以进一步提高信噪比。

2 系统测温 and 去噪原理

2.1 分布式光纤拉曼测温系统原理

激光器产生的光脉冲在光纤中传播时,光子与光纤中的介质相互作用,会产生拉曼后向散射光,而拉曼后向散射光又分为反斯托克斯光和斯托克斯光,其中,反斯托克斯光对温度的变化较为敏感。反斯托克斯光和斯托克斯光的光功率^[25]可表示为

$$P_{\text{as}}(T) = P_0 K_{\text{as}} \nu_{\text{as}}^4 \frac{1}{\exp(h\Delta\nu/kT) - 1} \times \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{\text{as}})L], \quad (1)$$

$$P_{\text{s}}(T) = P_0 K_{\text{s}} \nu_{\text{s}}^4 \frac{1}{1 - \exp(-h\Delta\nu/kT)} \times \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{\text{s}})L], \quad (2)$$

式中: P_0 为输入光的光功率; K_{as} 和 K_{s} 为与光纤的反斯托克斯光和斯托克斯光拉曼散射截面等有关的关系系数; ν_{as} 和 ν_{s} 分别为反斯托克斯光和斯托克斯光的频率; L 为光纤上某点到入射端的距离; α_{as} 、 α_{s} 和 α_0 分别为与反斯托克斯光、斯托克斯光和入射光在光纤中的传输损耗有关的系数; T 为光纤的温度; h 为普朗克常数; k 为玻尔兹曼常数; $\Delta\nu$ 为拉曼频移,在石英光纤中, $\Delta\nu = 13.2 \text{ THz}$ 。

把斯托克斯光作为参考信号,用反斯托克斯光与斯托克斯光两路光强度的比值来解调温度。与瑞利散射光相比,斯托克斯光与反斯托克斯光强度数量级更近,更容易解调。解调出的光纤温度^[22]可表示为

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta\nu} \ln \left[\frac{P_{\text{as}}(T)}{P_{\text{s}}(T)} \bigg/ \frac{P_{\text{as}}(T_0)}{P_{\text{s}}(T_0)} \right]}. \quad (3)$$

把反斯托克斯光和斯托克斯光功率的比值用电压比来代替,温度可表示为

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta\nu} \ln \left[\frac{U_{\text{as}}(T)}{U_{\text{s}}(T)} \bigg/ \frac{U_{\text{as}}(T_0)}{U_{\text{s}}(T_0)} \right]}. \quad (4)$$

2.2 FPGA 硬件累加迭代平均滤波算法

由于激光器和光电探测器在工作时会产生大量随机噪声,特别是微弱的拉曼散射信号在经过放大之后,噪声也会变强,这种噪声的典型特点就是具有零均值的统计特性。用FPGA对采集到的数据进行累加迭代,然后进行平均处理,这样就可以滤除大部分噪声,提高信噪比。

$$U_i(t_0 + l\Phi) = S_i(t_0 + l\Phi) + N_i(t_0 + l\Phi), \quad (5)$$

式中: $U_i(t_0 + l\Phi)$ 为第 l 次采集到的光纤上第 i 点的拉曼散射光转换后的电压值; t_0 为采样初始时刻; Φ 为采样周期; $S_i(t_0 + l\Phi)$ 为不包含噪声的有用信号; $N_i(t_0 + l\Phi)$ 为随机噪声。

因为 $S_i(t_0 + l\Phi)$ 是周期信号,因此

$$U_i(t_0 + l\Phi) = S_i(t_0) + N_i(t_0 + l\Phi). \quad (6)$$

这时的信噪比(SNR)为

$$R_{\text{SN}} = S_i(t_0) / \bar{N}_i, \quad (7)$$

式中: \bar{N}_i 为光纤上某一点的噪声有效平均值。

在采集 m 次之后,对信号进行累加,可以得到

$$\sum_{l=0}^{m-1} U_i(t_0 + l\Phi) = mS_i(t_0) + \sqrt{m} \bar{N}_i \quad (8)$$

此时信噪比变为

$$R_{SN} = \sqrt{m} S_i(t_0) / \bar{N}_i \quad (9)$$

对(7)式与(9)式进行比较,可以看出,信噪比提升了 \sqrt{m} 倍。

2.3 非线性小波变换阈值去噪法

小波变换由于具有时频分析、多分辨率分析等优点,近年来被应用在各种领域中,如图像处理、数据融合、去噪和滤波等。由小波变换发展而来的非线性小波变换阈值去噪法根据信号和噪声在小波域上的不同性质,即信号都集中在大的小波系数中,而噪声的小波系数比较小,设置小波系数阈值,把小于阈值的噪声去掉,保留了信号特征,从而实现去噪。

非线性小波变换阈值去噪法具体分为如下三步。

1)小波分解。因为只有 Haar 小波同时具有对称性和紧支性,所以选择 Haar 小波作为小波基,通过低通滤波器和高通滤波器,把信号分解为 n 层。

2)阈值的选择和量化。如果光纤上各点的温

度不同,那么采到的数据就会具有不同的特征,相比全局阈值,自适应阈值更有优势。阈值的量化处理方法有软阈值量化和硬阈值量化。硬阈值方法可以很好地保留信号边缘等局部特征,软阈值处理相对平滑,但会有边缘模糊等失真现象。为了保证信号的完整性,选择硬阈值量化。

3)小波重构。小波分解到 n 层的低频系数和经过阈值处理后的高频系数分别通过低通滤波器逆序和高通滤波器逆序完成小波重构。

3 系统方案

分布式光纤测温系统整体方案如图 1 所示。激光器作为源头产生脉冲信号;耦合器和分光片组成了波分复用器(WDM),负责产生所需要的斯托克斯光和反斯托克斯光;多模光纤作为传感光纤;雪崩光电二极管(APD)完成光电信号的转换;模/数转换器(A/D)和 FPGA 组成高速采集卡,其中,芯片采用的型号是 Intel 的 EP4CE30F23C6N,存储器选用两片 DDR2(Double Data Rate 2 SDRAM)存储器,和上位机通过 USB3.0 连接,最终和计算机一起完成数据的采集和处理。

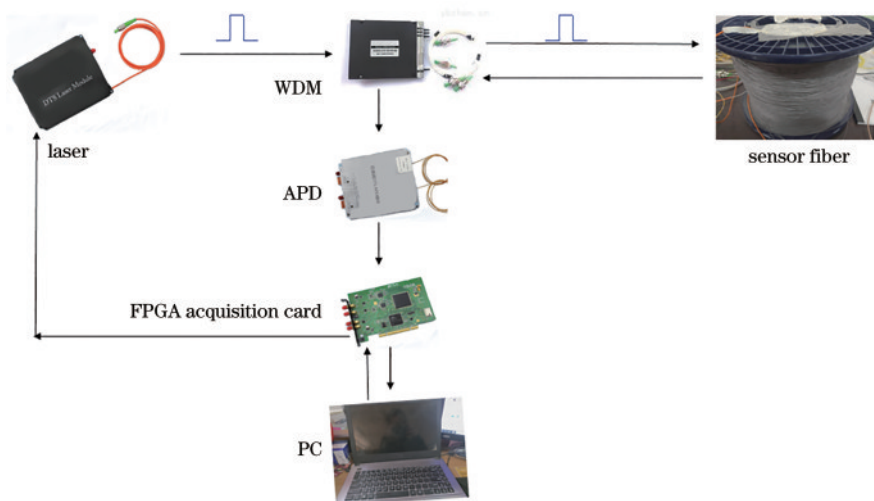


图 1 系统整体方案图

Fig. 1 Overall scheme of the system

系统工作过程为:计算机驱动激光器产生光脉冲,同时 FPGA 开始进行数据采集,光脉冲经过 WDM 到达传感光纤,散射回来的斯托克斯光和反斯托克斯光经过光电探测器被 A/D 采集到;然后送入 FPGA 进行累加迭代平均滤波;之后将结果传输到计算机,通过非线性小波变换阈值去噪法进行进一步去噪处理。

4 信号的采集与传输

首先,计算机通过控制 FPGA 产生电信号来驱动激光器,如图 2、3 所示,脉冲宽度为 $5 \mu\text{s}$,脉冲周期为 $105 \mu\text{s}$,电压幅值为 6.5 V 。

激光器开始工作后,光脉冲经波分复用器到达传感光纤,散射回来的拉曼信号经 APD 光电探测器



图 2 FPGA 产生的电脉冲信号

Fig. 2 Electrical pulse signals generated by FPGA



图 3 电脉冲信号参数

Fig. 3 Parameters of the electrical pulse signal

转换为电信号。图 4 为示波器测得的斯托克斯光转换后的电压信号。

由图 4 可以看出, FPGA 单次触发激光器产生的拉曼散射信号噪声很大, 需要进行去噪处理。

第二代系统级调试工具 SignalTap II 全称

SignalTap II Logic Analyzer, 可以捕获和显示实时信号, 是一款功能强大且极具实用性的 FPGA 片上调试工具软件。图 5 便是通过 SignalTap II 捕获的斯托克斯光和反斯托克斯光的实时数据曲线。

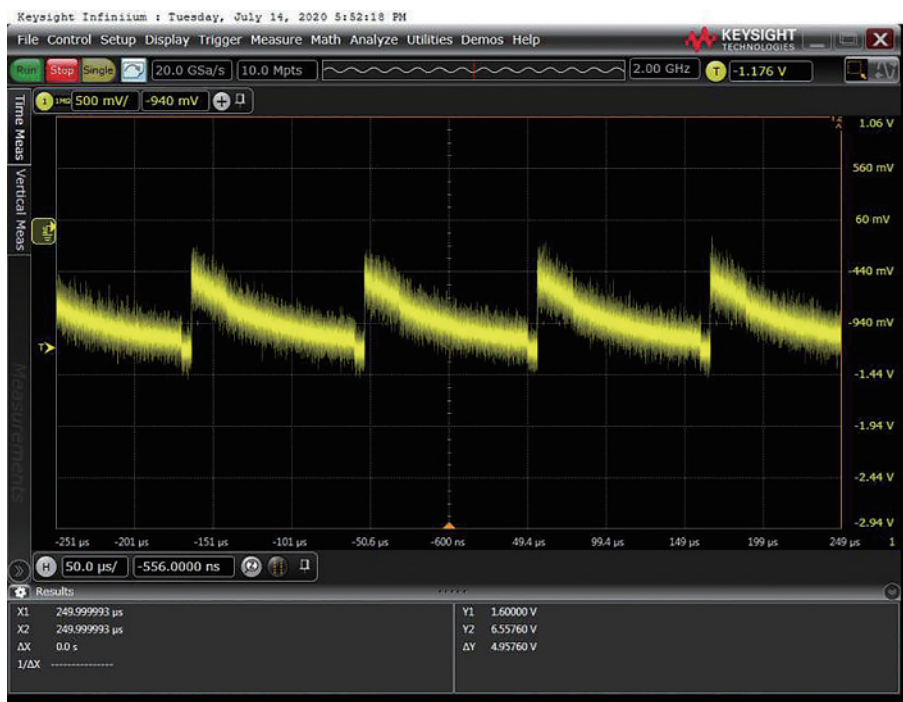


图 4 斯托克斯信号电压

Fig. 4 Voltage of Stokes signal



图 5 SignalTap II 显示曲线

Fig. 5 Display curve on SignalTap II

在成功捕获到两路拉曼散射信号之后,再通过 FPGA 和上位机对信号进行处理。

5 FPGA 硬件累加迭代平均滤波算法和非线性小波变换阈值去噪法实现过程

图 6 为 FPGA 累加迭代平均滤波实现过程。A/D 模块用于把电压信号转换成数字信号。FPGA 由 single acquisition 模块、accumulation 模块、shift average 模块组成。single acquisition 模块用于实现单次采集;accumulation 模块用于累加迭代,counter 是计数器,对每一次累加迭代进行计数;shift average 模块用于对移位取平均值。DDR memory 是 DDR 型存储器,host computer 是上位机。其中,A/D 芯片的型号为 AD9226,位宽为

12 bit,采样速率最高为 65 MSa/s。12 bit 分辨率可以表示的数据量为 4096,而 A/D 输入电压为 $-5\sim 5\text{ V}$,这样电压的单位增量为 $5000/4096=1.22\text{ mV}$,系统精度较高。而采样率越高,采集到的数据点越多,在 50 MSa/s 下,9 km 长度光纤上最多可以采到 5000 个点。

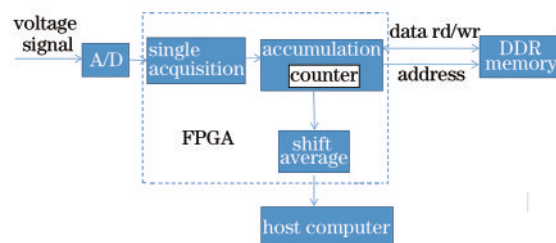


图 6 FPGA 累加迭代平均滤波实现过程

Fig. 6 Implementation process of FPGA cumulative iterative average filtering

算法实现过程为:斯托克斯电压信号经 A/D 转换成数字信号, FPGA 将第一次采到的数据写到 DDR 相应的地址中;当第二次采到数据后, FPGA 从 DDR 存储器中读出第一次采到的数据, 并与第二次采到的数据相加, 然后再写入到 DDR 存储器中, 同时计数器加 1; 以此类推, 当计数器累加到所要求的次数后, 从 DDR 存储器地址中读出此刻的数据, 通过移位操作取平均值, 实现滤波; 再把数据发送到上位机进行进一步处理。

使用软件非线性小波变换阈值去噪对噪声进行进一步滤除, 其中分解层数的选择对去噪效果影响比较大。小波分解层数过少, 会有较多噪声残留, 难以达到好的去噪效果, 而分解层数过多又会滤除掉信号中的有用信息, 选择 5 层时, 分解效果最好。非线性小波变换阈值去噪流程如图 7 所示。

首先选取 Haar 小波作为小波基, 然后把小波分解成 5 层, 通过硬阈值量化方法确定阈值, 采用自适应

应阈值, 可以很好地保留信号边缘等局部特征。在确定阈值后, 保留大于阈值的小波系数, 小于阈值的设置为 0, 之后再重构信号, 从而实现二次去噪过程。

6 实验测试与分析

根据系统方案搭建实验系统, 如图 8 所示。



图 8 实验系统图

Fig. 8 Experimental system diagram

把光纤放置在 27 °C 环境下, 分别进行 1000 次、8000 次、16000 次累加迭代平均, 斯托克斯光强度随距离变化的实验结果如图 9 所示。图 10 为 1000 次、8000 次累加迭代平均去噪效果放大图。

由图 9、10 可以看出: 原始的斯托克斯光信号在经过 1000 次累加迭代平均之后, 大量噪声被去除, 但是将图形放大之后, 还是可以看出有噪声存在; 于是又经 8000 次累加迭代平均, 噪声进一步滤除; 但是经 16000 次累加迭代平均之后, 去噪效果和 8000 次基本相同, 说明累加迭代平均在达到一定次数之后, 再增加累加次数并不能进一步去噪。

理论上, 原始信号在经过 1000 次、8000 次、16000 次累加迭代平均后, 信噪比分别提高 29.4857 dB、38.5166 dB、41.5269 dB。在经过计算后, 原始的斯托克斯光信号信噪比为 0.5143 dB, 在累加 1000 次后, 信噪比为 28.5874 dB, 提高了 28.0731 dB; 累加 8000 次后, 信噪比为 37.2633 dB, 提高了 36.748 dB; 累加 16000 次后, 信噪比变为 39.1449 dB, 提高了 38.6306 dB。累加迭代在 1000 次、8000 次、16000 次时的响应时间分别为 0.9 s、7.2 s、14.4 s。可以看出, FPGA 累加迭代平均去噪效果很好, 但在达到 8000 次之后, 再增加累加迭代次数, 去噪效果变得不明显。为了保持优良的去噪特性, 同时减少系统累加迭代的相应时间,

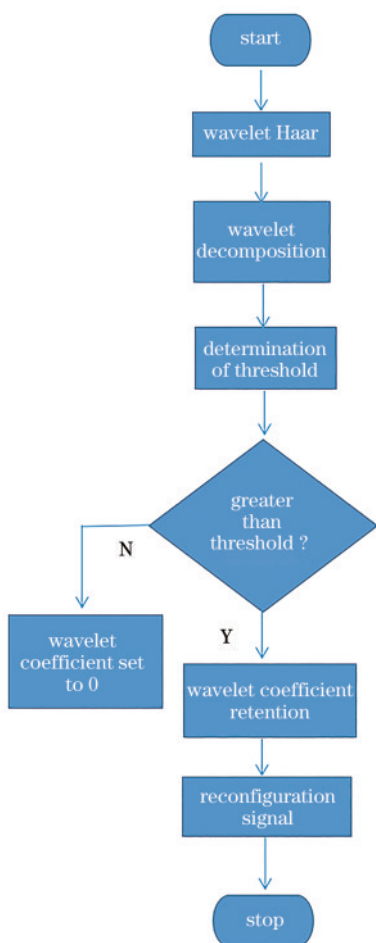


图 7 非线性小波变换阈值去噪流程图

Fig. 7 Flowchart of nonlinear wavelet transform threshold denoising

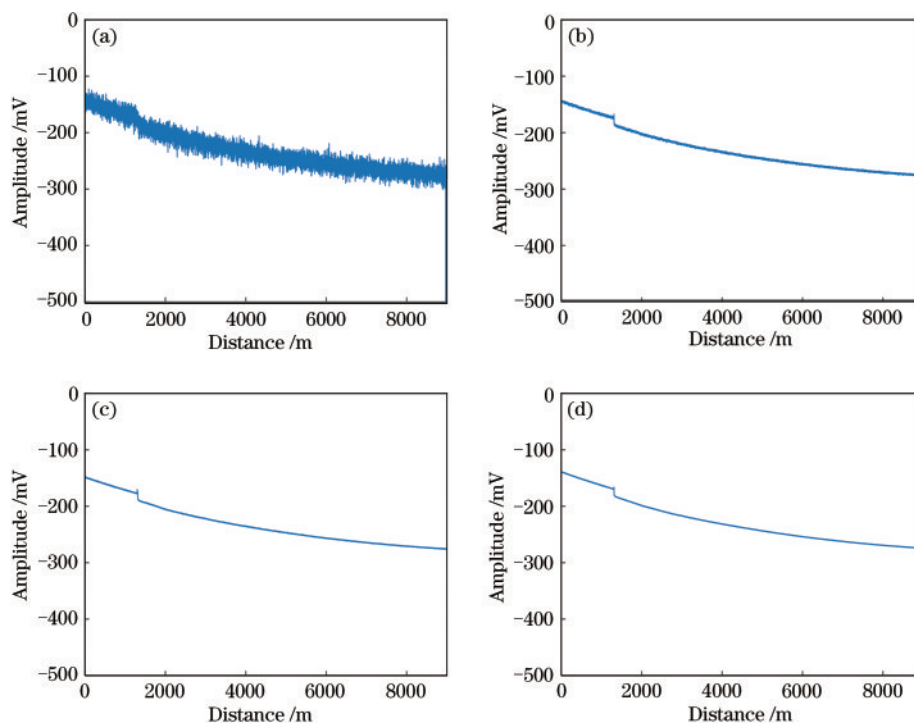


图 9 累加迭代平均去噪的效果。(a)原始信号;(b)1000次迭代;(c)8000次迭代;(d)16000次迭代

Fig. 9 Effect of cumulative iterative average denoizing. (a) Original signal; (b) 1000 iterations; (c) 8000 iterations; (d) 16000 iterations

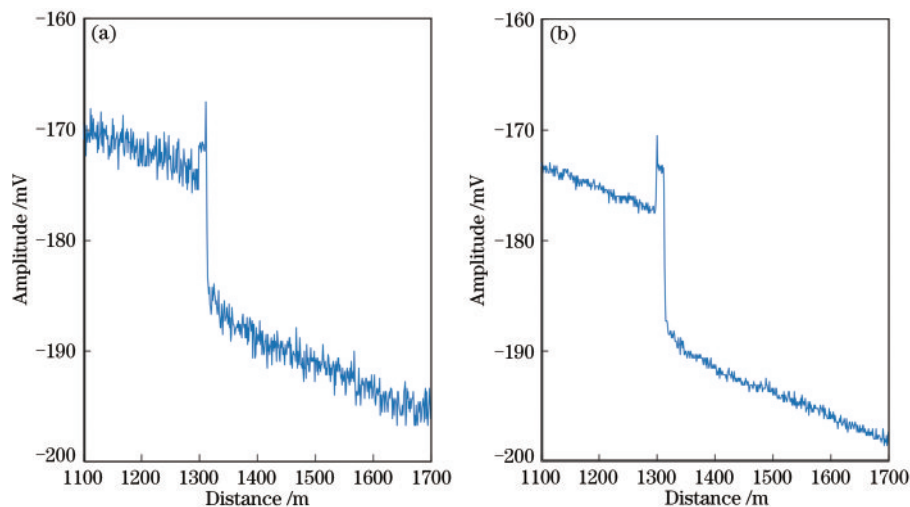


图 10 累加迭代平均去噪效果放大图。(a)1000次迭代;(b)8000次迭代

Fig. 10 Enlarged effect of cumulative iterative average denoizing. (a) 1000 iterations; (b) 8000 iterations

累加迭代 8000 次最为适宜。

而在用软件实现累加迭代平均时,由于每次采集到数据之后需要对曲线进行刷新,间隔为 5 ms,这样 1000 次累加,就会额外增加 5 s 的相应时间,8000 次累加就会增加 40 s 的相应时间。因此,利用 FPGA 高速并行的特点来进行累加迭代平均,优势更明显。用 8000 次累加迭代平均去噪后的斯托克斯光和反斯托克斯光解调出来的温度信号如图 11 所示。

由图 11 可以看出,经 8000 次累加迭代平均对斯托克斯光和反斯托克斯光进行去噪后,解调出来的温度信息仍然存在噪声。为了提高测温精度,采取非线性小波变换阈值去噪法,去噪效果如图 12 所示,经过计算,此时的信噪比为 44.5677 dB,与图 11 相比,信噪比提高了 7.3044 dB。

为了进一步验证累加迭代平均和非线性小波变换阈值去噪后测温精度明显提高,分别将传感光

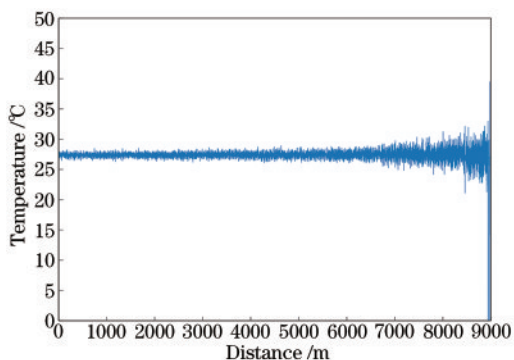


图 11 8000 次累加迭代平均去噪后的温度曲线
Fig. 11 Temperature curve after average denoising of 8000 cumulative iterations

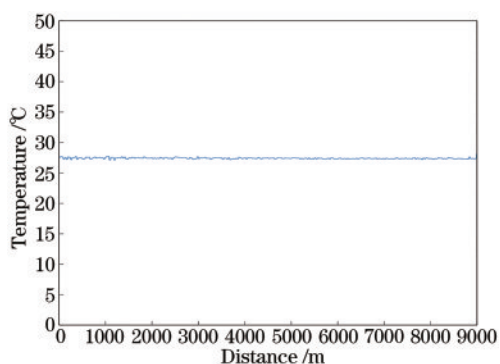


图 12 非线性小波变换阈值去噪后的温度曲线
Fig. 12 Temperature curve after threshold denoising of nonlinear wavelet transform

纤的 1300 m 处加热到 40, 60, 80 °C, 结果如图 13 所示。

为了计算测温误差, 将光纤加热到 30~80 °C, 测温数据如表 1 所示。

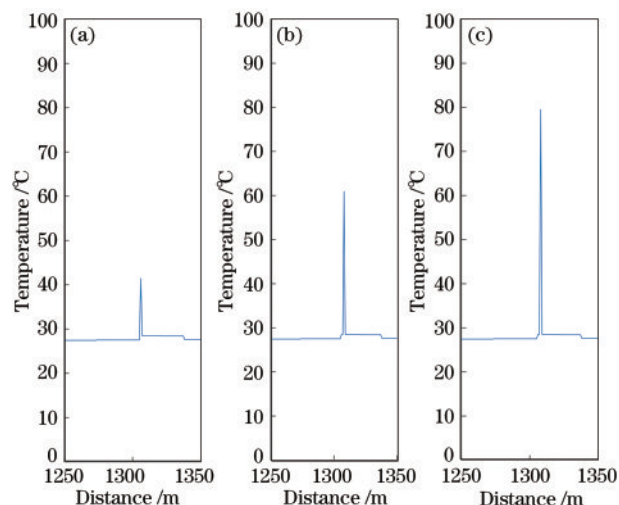


图 13 加热后的温度曲线。(a)40 °C;(b)60 °C;(c)80 °C
Fig. 13 Temperature curves after heating. (a) 40 °C; (b) 60 °C; (c) 80 °C

表 1 测温数据

Table 1 Temperature measurement data

Temperature after heating/°C	Measured temperature/°C	Error/°C
30	29.4	-0.6
40	41.4	1.4
50	51.5	1.5
60	60.9	0.9
70	71.4	1.4
80	79.5	-0.5

经过实验验证, 可以得知, 在经过累加迭代平均和非线性小波阈值去噪后, 分布式光纤测温系统在测量温度方面具有优势, 实现了在 9 km 测量距离上 ±1.5 °C 的测温精度, 可以应用在实际生产生活中。

7 结 论

提出了基于 FPGA 的累加迭代平均滤波算法、非线性小波变换阈值去噪法, 并且运用这两种算法成功减弱了温度测量过程中的随机噪声对系统性能的影响。在经过 8000 次累加迭代平均后, 信噪比提高了 36.748 dB, 最终经过非线性小波阈值去噪, 测温精度稳定在 ±1.5 °C。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Xing H J, Qiao Q X, Jin Z X. Monitoring technology of nuclear power primary circuit leakage point based on distributed temperature sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5): 0506004.
邢豪健, 乔秋晓, 金钟燮. 基于分布式光纤拉曼测温系统的核电一回路泄漏点监测技术[J]. 光子学报, 2019, 48(5): 0506004.
- [3] Zhang L. Online temperature detection in power cable line[J]. Applications of IC, 2020, 37(3): 64-65.
张利. 温度在线检测技术在电力电缆线路的应用[J]. 集成电路应用, 2020(3): 64-65.
- [4] Li J, Yan B Q, Zhang M J, et al. Long-range Raman distributed fiber temperature sensor with early warning model for fire detection and prevention[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(10): 3711-3717.
- [5] Lang G W, Wei Z M, Chen W, et al. Research on key algorithms of distributed optical fiber fire monitoring system [J]. Optical Fiber & Electric

- Cable and Their Applications, 2019(4): 32-35.
郎国伟, 魏志猛, 陈伟, 等. 分布式光纤火灾监测系统的关键算法研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2019(4): 32-35.
- [6] Wang H X, Zha X X. Prediction analysis of indoor fire temperature [J]. Building Structure, 2017, 47(23): 46-49.
王洪欣, 查晓雄. 建筑室内火灾温度的预测分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(23): 46-49.
- [7] Ning F. A study on space resolution and system stability of distributed optical fiber Raman temperature measurement system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
宁枫. 分布式光纤拉曼测温系统空间分辨率及稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [8] Li J. The research of novel temperature demodulation method and advance prewarning model for fiber Raman sensing system [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
李健. 面向光纤拉曼传感系统的新型温度解调方法及超前预警模型研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [9] Zhang M J, Li J, Liu Y, et al. Temperature demodulation method for distributed fiber Raman temperature measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0306002.
张明江, 李健, 刘毅, 等. 面向分布式光纤拉曼测温的新型温度解调方法[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0306002.
- [10] Wang Q S, Wang W J, Guo X, et al. Error correct method of distributed raman temperature sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 170602.
王青山, 王伟杰, 郭旭, 等. 分布式拉曼光纤温度传感器的误差修正方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 170602.
- [11] Xia M, Tang X H, Wang Y, et al. Comparative analysis of strain monitoring of installed optical fiber composite overhead ground wire based on 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.
- [12] Tang W J. Research and implentation of distributed optical fiber temperature sensing system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
唐文娟. 分布式光纤温度传感系统的研究与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [13] Wang Y, Jiang Y, Ma W Y. Optimization of demodulation algorithm for the distributed optical fiber Raman temperature measurement system [J]. Optical Technique, 2018, 44(6): 646-650.
王焱, 江毅, 马维一. 分布式光纤拉曼测温系统中解调算法的优化[J]. 光学技术, 2018, 44(6): 646-650.
- [14] Xue Z P, Wang D, Wang Y, et al. Research on performance optimization of SNR for distributed optical fiber Raman temperature measurement system [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(1): 17-21.
薛志平, 王东, 王宇, 等. 分布式光纤拉曼测温系统信噪比优化研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(1): 17-21.
- [15] Sun B N. Noise analysis and optimization of distributed Raman fiber temperature sensor [D]. Jinan: Shandong University, 2014.
孙柏宁. 分布式拉曼光纤温度传感系统的噪声分析及优化[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [16] Soto M A, di Pasquale F. Distributed Raman sensing [M]//Peng G D. Handbook of optical fibers. Singapore: Springer, 2017: 1-55.
- [17] Soto M A, Ramirez J A, Thévenaz L. Reaching millikelvin resolution in Raman distributed temperature sensing using image processing [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9916: 99162A.
- [18] Liu T, Zhang W P, Chen H F, et al. Reduction of system noise in distributed optical fiber Raman temperature sensor by Kalman filter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1643-1647.
刘涛, 张文平, 陈慧芳, 等. 卡尔曼滤波在分布式拉曼光纤温度传感系统去噪中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1643-1647.
- [19] Zou M L. The precision improvement method and software design of distriuted optical fiber temperature measurement system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 26.
邹孟霖. 分布式光纤测温系统精度提高方法及其软件设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 26.
- [20] Tong J K. Development of distributed optical fiber Raman temperature measurement device based on FPGA [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
佟敬阔. 基于FPGA的分布式光纤拉曼测温仪研制[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [21] Desjardins A E, Vakoc B J, Suter M J, et al. Real-time FPGA processing for high-speed optical frequency domain imaging [J]. IEEE Transactions on

- Medical Imaging, 2009, 28(9): 1468-1472.
- [22] Somkuarnpanit S T S, Saetang K. FPGA-based multi protocol data acquisition system with high speed USB interface [C]//Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, March 17-19, 2010, Hong Kong, China. [S. l.: s. n.], 2010.
- [23] Wang X Y, Lu Y H, Zhang L K. Design and implementation of high-speed real-time data acquisition system based on FPGA [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2006, 13(4): 61-66.
- [24] Sheng Q H, Yu Z, Lu B, et al. Real-time phase-sensitive optical time-domain reflectometry signal processing system based on heterogeneous accelerated computing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0104002.
- 盛庆华, 俞钊, 卢斌, 等. 基于异构加速的 Φ -OTDR 实时信号处理系统 [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104002.
- [25] Wang Z L. Signal processing and performance improvement for distributed fiber Raman temperature sensor [D]. Jinan: Shandong University, 2015: 29-31.
- 王宗良. 分布式光纤拉曼温度传感系统信号处理及性能提升 [D]. 济南: 山东大学, 2015: 29-31.