

基于高频微波技术的分布式布里渊光纤温度传感器

陈福昌 胡佳成 张承涛 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘要 提出了一种基于分布式布里渊光纤传感系统的温度快速测量方案。该方案基于外差相干检测原理, 利用高速脉冲检波管对布里渊散射信号进行直接探测, 从而缩短了测量时间; 并结合累加平均与小波变换技术, 减小了布里渊散射信号中的噪声, 通过对去噪后的信号进行解调实现了长距离温度测量。实验结果表明, 在 24.8 km 的长度范围内, 温度测量误差小于 3 °C, 测量时间小于 3 s。

关键词 传感器; 布里渊散射; 高频微波; 温度测量; 小波变换

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0605009

Distributed Brillouin Optical Fiber Temperature Sensor Based on High Frequency Microwave Technology

Chen Fuchang Hu Jiacheng Zhang Chengtao Lin Zunqi

(National Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A scheme for fast temperature measurement based on distributed Brillouin optical fiber sensor is proposed. The Brillouin scattering signal is detected by the high speed pulse RF detector based on the principle of heterodyne coherent detection, with which the measuring time can be decreased. Moreover, the noise of the Brillouin scattering signal is decreased by combining cumulative average technology with wavelet transform technology. Thus the de-noised signal is demodulated for temperature measurement within large distance. The experimental results make it clear that a temperature measurement error of less than 3 °C and a measuring time of less than 3 s can be achieved at a distance of 24.8 km.

Key words sensors; Brillouin scattering; high frequency microwave; temperature measurement; wavelet transform

OCIS codes 290.5830; 060.2370; 280.4788; 040.5160

1 引 言

布里渊分布式光纤传感器具有分布式测量、探测距离长、抗电磁干扰、体积小质轻等许多优点, 在石油天然气管道监控、电路线路监控、油气井监控、火警预报等许多领域得到广泛的应用^[1]。基于布里渊光时域反射技术(BOTDR)的探测方法一般分为两种: 直接探测和相干检测。直接探测是采用全光纤马赫-曾德尔干涉仪或法布里-珀罗(F-P)干涉仪将

布里渊散射信号和瑞利信号分离, 然后对布里渊散射信号进行解调。该方法信噪比较低, 系统不稳定^[2]。相干检测是利用本振光与布里渊散射光进行拍频, 并采用高速光电探测器(PIN)管对拍频信号进行光电转换, 然后通过扫频、布里渊频谱拟合等方法对布里渊散射信号进行解调。该方法精度较高, 但测量时间长, 一般需要 30 s 以上, 限制了其在一些需要快速监测领域的应用^[3]。

收稿日期: 2011-12-29; **收到修改稿日期:** 2012-03-22

作者简介: 陈福昌(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事分布式光纤传感技术方面的研究。E-mail: ouch27@163.com

导师简介: 林尊琪(1942—), 男, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要从事高功率激光物理方面的研究。

E-mail: zqin@mail.shcnc.ac.cn

本文提出了一种基于分布式布里渊光纤传感系统的温度快速测量方案,利用外差相干检测技术,对布里渊散射信号进行检测。通过高频微波检测技术,实现在 11 GHz 高频段直接对布里渊散射信号进行采集与处理,缩短了测量时间。同时,在信号处理过程中结合累加平均与小波变换技术对信号进行去噪,降低了信号噪声,实现了光纤传感系统长距离温度测量。该方案省去了扫频模块等复杂器件,降低了系统成本与复杂性,对实际应用具有重要的意义。

2 传感原理与系统

在普通单模光纤中,自发布里渊散射是光纤中的光学光子与声学声子发生非弹性碰撞而产生的一种散射过程。声波引起材料的折射率周期性变化使得自发布里渊散射光产生布里渊频移^[4]。布里渊散射光与入射光之间的频差约为 11 GHz。布里渊分布式光纤温度传感器主要是利用布里渊散射光信号对温度敏感的特点,通过检测布里渊散射信号,将信号中的温度信息解调并转换成实际的温度。

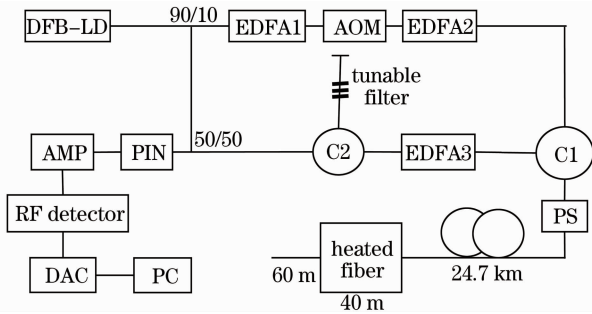


图 1 基于高频微波技术的分布式光纤温度传感的 BOTDR 实验系统

Fig. 1 Experimental arrangement for BOTDR with the capability of temperature sensing based on high frequency microwave technology

图 1 是基于高频微波技术的分布式光纤温度传感的 BOTDR 实验系统。系统光源为波长 1543.2 nm,线宽 70 kHz 的分布反馈光纤激光器 (DFB-LD)。由光源发出的光束经 90/10 的光纤耦合器进行分束,10% 的一路作为本振光,90% 的一路光经过掺铒光纤放大器 (EDFA1) 进行放大,进入声光调制器 (AOM),产生重复频率 2 kHz、脉宽 100 ns 的探测脉冲光,经过掺铒光纤放大器 (EDFA2) 进行放大,峰值功率达 80 mW。放大后的探测脉冲光经环行器 (C1) 通过扰偏器 (PS) 入射到 24.8 km 长的普通单模光纤。探测光在光纤中产生

后向布里渊散射光。后向布里渊散射光经过掺铒光纤放大器 (EDFA3) 进行放大,通过环行器 (C2) 进入带宽 0.09 nm,波长分辨率 0.01 nm 的可调谐窄带滤波光栅,滤除掉放大的自发辐射噪声 (ASE) 和瑞利散射光,滤除噪声后的布里渊散射光与本振光通过 50/50 的光纤耦合器进入高速 PIN,在其光敏面上进行拍频,产生高频微波信号,经过放大器 (AMP) 进行放大,最后经过高速脉冲检波管 (RF detector) 进行检波,得到 11 GHz 高频段的布里渊散射信号。经过数据采集卡 (DAC) 将此信号送入计算机 (PC) 进行温度解调。在一定的温度范围内,布里渊散射信号功率与温度成正比^[5]:

$$P_{B0} + \Delta P_B = K(T_0 + \Delta T), \quad (1)$$

式中 K 为温度灵敏系数, T_0 为初始温度, ΔT 为温度变化量, P_{B0} 为初始布里渊散射信号功率, ΔP_B 为因温度变化引起的布里渊散射信号功率的变化量。对 (1) 式进行归一化处理,得

$$\frac{P_{B0} + \Delta P_B}{P_{B0}} = \frac{K(T_0 + \Delta T)}{P_{B0}}. \quad (2)$$

对 (2) 式进行整理,得

$$\Delta P_N = K_N \Delta T, \quad (3)$$

式中 $\Delta P_N = \Delta P_B / P_{B0}$ 为归一化的布里渊信号功率变化量, $K_N = K / P_{B0}$ 为归一化的温度灵敏系数。实际的温度变化量可以计算为

$$\Delta T = \frac{\Delta P_N}{K_N}. \quad (4)$$

当直接利用 (4) 式测量温度时,解调得到的温度测量误差很大。这主要是由布里渊散射信号中包含的噪声大引起的。

布里渊散射信号的噪声来源主要包含偏振噪声、随机噪声和低频噪声。偏振噪声是由于光纤上每一点产生的布里渊散射光的偏振方向与本振光的偏振方向不能保持一致引起的,该噪声可以通过扰偏器或者正交偏振收集技术消除^[6,7]。随机噪声是一种前后独立的平稳随机过程,在任何时候其幅度、相位、波形都是随机的,可以看作白噪声,可以利用累加平均算法消除^[8]。但是累加平均无法消除高频噪声的影响,温度测量误差仍然较大。为进一步减小系统测量误差,需要结合其他去噪技术。

3 小波去噪原理

目前,小波变换已成为一种重要的噪声消除手段。小波变换能够去噪是因为小波变换具有低熵性、多分辨率特性、去相关性以及小波基函数选择灵

活等特点。其对高频噪声具有很好的去噪效果。特别是信号信噪比越好,小波去噪效果越好^[9]。小波去噪过程就是将混入高频信号中的噪声消除,重新构建真实信号。

图2是一个信号的小波分解树。小波分解是在每一尺度下将信号分解为近似分量 A_i 和细节分量 D_i ,在更高级分解中,将近似分量 A_i 分解为频率更低的近似分量 A_{i+1} 和细节分量 D_{i+1} 。近似分量 A_i 只包含低频成分,而细节分量 D_i 包含高频成分。因此,对小波系数 α_i 进行合适的处理,再把调整后的小波进行重构,就可以得到去噪后的信号^[10]。去噪后的信号为

$$S = A_n + \sum_{i=1}^n \alpha_i D_i. \quad (5)$$

小波分析中用到的小波基函数不是唯一的,所

表1 不同小波函数的特点

Table 1 Characteristics of different wavelet functions

Wavelet	Characteristic
Haar dbN	Compactly supported,orthogonality in the time domain limited supported,orthogonality
Mexican Hat	In time domain and frequency have domain good localizing peculiarities, no orthogonality
Morlet	No orthogonality, dissatisfy admissible conditions, no compactly supported
Meyer	Orthogonality,no compactly supported

在实际应用中,为了在计算机上实现小波变换,一般采用离散小波变换。Morlet小波和Meyer小波由于不存在紧支集不适合做离散小波变换。为保证运算速度,一般选用正交小波,如Haar小波和dbN小波。由于Haar小波不是连续可微的,一般用于理论研究;dbN小波为正交离散小波,在快速小波变换过程中具有速度快、精度高等优势。对于小波分解层次,其去噪效果会随分解层数的增加而变好,但是分解层次增加到一定层数后去噪效果改善不明显,实际应用中一般取5层左右。

对于小波去噪方法,有3种。1)强制去噪,方法简单,去噪后信号比较光滑,容易丢失信号有用成分;2)硬阈值去噪,可保留信号特征,但去噪后信号会产生附加振荡,不具有原信号光滑性;3)软阈值去噪,去噪后信号比较平滑,同时也能很好地保留有用信号。对于阈值规则的选取,直接关系到去噪效果的优劣。如果阈值选取过小,将在去噪后的信号中保留部分噪声信息,使去噪效果变差;如果阈值选取过大,则会将一部分有用信号去掉,使得去噪后的信号丢失信息。常用的阈值选取规则有4种:1)Rigrsure规则,阈值风险小,不易丢失原信号中的有

有满足小波容许性条件的函数都可以作为小波基函数,最优小波基函数的选择是工程应用中一个十分重要的问题,因为不同的小波基函数分析同一个问题会产生不同的结果。常用的基本小波函数及其特点见表1。

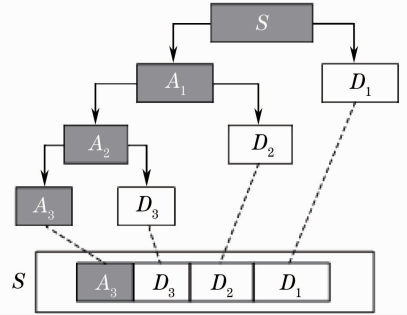


图2 小波分解树

Fig. 2 Wavelet decomposition tree

用成分;2) Sqtwolog规则,在信号噪声是白噪声的情况下去噪效果较明显,且不易丢失有用信号,但阈值风险较大;3) Heursure规则,是一种最优的选择,是Rigrsure和Sqtwolog规则的综合改进,阈值风险较小,有用信号不易丢失;4) Minimaxi规则,不易丢失有用信号。

由以上分析可知,在应用小波变换进行信号去噪的过程中,一般需要4个步骤:1)选择小波基;2)确定信号分解层数;3)选择去噪方法;4)确定阈值选取规则。

4 实验及结果分析

在实验中,室温为16℃,将40m的光纤圈放入恒温槽中进行加热,调节恒温槽温度至60℃,可得到布里渊散射信号。

图3为通过高速脉冲检波管直接探测得到且经过4096次累加平均的布里渊散射信号。由图可知,在24.8km处信号有凸起,这是由于40m长的光纤圈置于60℃的恒温槽内。从图中可以看出信号曲线夹杂大量噪声。

对图3的信号进行小波去噪,选择DB5小波基

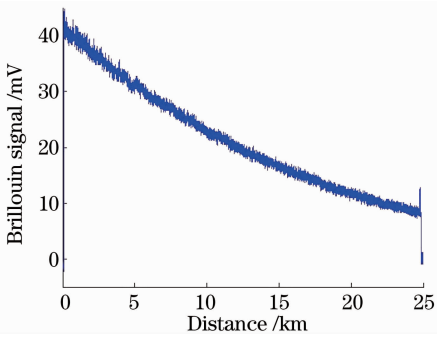


图 3 未经小波去噪处理的布里渊散射信号

Fig. 3 Brillouin scattering signal without wavelet de-noising

函数将信号分解为 7 层,采用软阈值去噪方法,通过 Heursure 阈值选取规则进行各层阈值设置: D_1 为 1.572、 D_2 为 1.622、 D_3 为 1.556、 D_4 为 0.487、 D_5 为 0.276、 D_6 为 0.250、 D_7 为 0.133,去噪后的信号如图 4 所示。

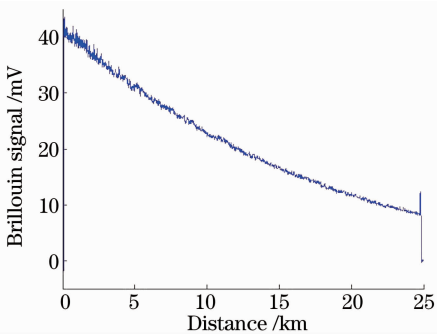


图 4 经过小波去噪处理后的布里渊散射信号

Fig. 4 Brillouin scattering signal with wavelet de-noising

对比图 3 和图 4 可以看出,小波去噪后的信号要比去噪前的信号好,但是整条信号曲线并不平滑。这主要是由于扰偏器没有将偏振噪声完全滤除,还残留有小部分偏振噪声。

图 5 为未经过小波去噪处理和经过小波去噪处理的布里渊散射信号的对比图。可以看出,小波去噪在减小布里渊散射信号噪声的同时完好地保留了 40 m 的加热光纤圈感应的温度信息。将恒温槽的温度分别调至 40 °C、60 °C、80 °C、100 °C,得到布里渊散射信号曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出,随着光纤圈温度的升高,布里渊散射信号也相应地增加。将图 6 中的布里渊散射信号进行归一化即为图 7。经过归一化后,可计算出布里渊散射信号的温度灵敏度 K_N 为 0.96%/°C。

为进一步验证布里渊散射信号的温度灵敏度,将恒温槽温度分别调至 35 °C、45 °C、55 °C、65 °C、

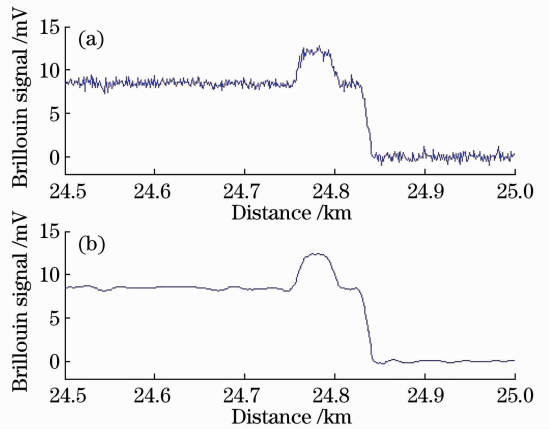


图 5 未经过小波去噪处理(a)和经过小波去噪处理(b)的布里渊散射信号

Fig. 5 Brillouin scattering signal without wavelet de-noising (a) and with wavelet de-noising (b)

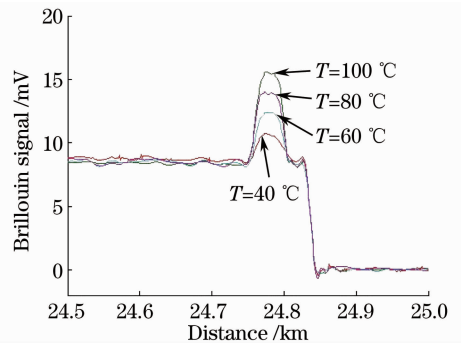


图 6 不同温度下的布里渊散射信号

Fig. 6 Brillouin scattering signals of different temperatures

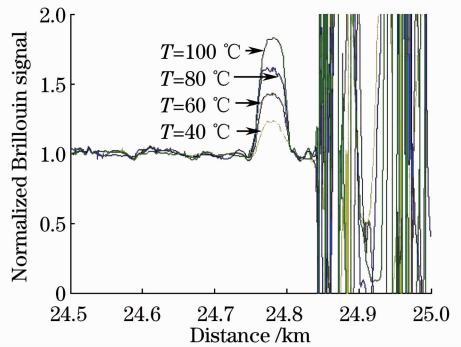


图 7 归一化的布里渊散射信号

Fig. 7 Normalized Brillouin scattering signals 75 °C、85 °C、95 °C,实际测得温度如表 2 所示。

由表 2 可知,对高速脉冲检波管直接探测得到的布里渊散射信号进行温度解调,得到的温度测量误差小于 3 °C。对信号进行 4096 次的累加平均需要时间为 2 s,再用小波变换进行信号的去噪,所消耗的一次总测量时间不会超过 3 s。

表2 不同温度下测量得到的光纤圈温度

Table 2 Measured temperatures of fiber loop at different temperatures

Real temperature / $^{\circ}\text{C}$	1	2	3	4	5	6	7	Averaged temperature / $^{\circ}\text{C}$
35	34.7	33.5	32.1	34.1	35.4	37.1	34.2	34.4
45	45.2	44.1	44.5	47.4	43.1	46.3	45.3	45.1
55	54.2	55.3	57.6	54.2	53.7	54.1	52.3	54.5
65	66.3	65.1	63.4	67.1	64.3	66.1	65.2	65.3
75	75.3	77.5	74.2	72.9	74.4	72.5	75.3	74.6
85	85.1	87.7	83.2	83.8	87.2	85.4	84.3	85.2
95	94.7	94.2	97.1	96.5	94.2	92.5	95.1	94.9

5 结 论

提出了一种基于分布式布里渊光纤传感系统的温度快速测量方案。通过高速脉冲检波管对布里渊散射信号进行直接检测,使测量时间小于3 s。同时在信号处理过程中,结合累加平均与小波变换技术,减小了布里渊散射信号中的噪声,在24.8 km的光纤长度上,温度测量误差小于3 $^{\circ}\text{C}$ 。本系统不需要扫频模块等复杂器件,结构简单,稳定性较高,且降低了成本,对实际应用具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Song Muping, Qiu Chao. Long-distance Brillouin optical time domain reflectometer with two-parameter sensing for standard single-mode optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 954~958
宋牟平, 裘超. 普通单模光纤的长距离双参量传感布里渊光时域反射计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 954~958
- 2 H. H. Kee, G. P. Lees, T. P. Newson. All-fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing by spontaneous Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(10): 695~697
- 3 Song Muping, Fan Shengli, Chen Hao *et al.*. Study on the technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on optical interferometric heterodyne detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 233~236
宋牟平, 范胜利, 陈好等. 基于光相干外差检测的布里渊散射 DOFS 的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 233~236
- 4 S. M. Maughan, H. H. Kee, T. P. Newson. Simultaneous distributed fiber temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter [J].

Meas. Sci. Technol., 2001, **12**(7): 834~842

- 5 Song Muping, Bao Chong, Ye Xianfeng. Brillouin optical time-domain analyzer based on orthogonal polarization control for long-distance distributed optical-fiber sensors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 757~762
宋牟平, 鲍翀, 叶险峰. 基于正交偏振控制的布里渊光时域分析长距离分布式光纤传感器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 757~762
- 6 An Sun, Bai Chen, Jialin Chen *et al.*. Detection of Brillouin scattering temperature signal in Brillouin optical time-domain reflectometer sensing system based on instantaneous frequency measurement technology [J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(12): 124401
- 7 Muping Song, Bin Zhao, Xianmin Zhang. Optical coherent detection Brillouin distributed optical fiber sensor based on orthogonal polarization diversity reception[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5): 271~274
- 8 Hou Sizu, Jian Yanhong, Li Cheng. Wavelet de-noising applied in Raman single-mode fiber sensor [J]. *Computer Simulation*, 2010, **27**(3): 366~370
侯思祖, 简燕红, 李程. 小波去噪在拉曼单模光纤传感系统中的应用[J]. *计算机仿真*, 2010, **27**(3): 366~370
- 9 He Jianping, Zhou Zhi, Wu Yuanhua *et al.*. Application of wavelet denoising method in Brillouin optical sensing technique [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(4): 75~80
何建平, 周智, 吴源华等. 小波滤波在布里渊光纤传感技术中的应用[J]. *光电工程*, 2009, **36**(4): 75~80
- 10 Qiu Weiwei, Sui Qingmei, Zhang Guitao *et al.*. Study on fiber-optic BOTDR temperature sensor signal denoising based on wavelet transform[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(11): 26~29
邱卫卫, 隋青美, 张桂涛等. 基于小波变换的 BOTDR 光纤温度传感系统去噪声研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(11): 26~29

栏目编辑:何卓铭