

文章编号: 0258-7025(2007)04-0503-04

基于高频微波技术的分布式光纤传感器 布里渊散射信号检测

孙安, 陈嘉琳, 李国扬, 王利, 常丽萍, 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联合实验室, 上海 201800)

摘要 分析了布里渊分布式光纤传感技术原理,采用自行研制的光纤单纵模分布反馈(DFB)激光器结合电光调制技术,利用相干检测技术,对布里渊微弱后向散射信号进行检测。通过改进滤波放大技术,对微弱后向散射光信号进行有效放大,再用扰偏技术及信号采样平均处理,实现对光纤传感器后向布里渊散射信号在11 GHz高频段直接采集显示。结果表明,探测所得布里渊散射信号峰值功率可达50 mV,能有效降低解调系统信号检测难度,改善了系统信噪比(SNR)。初步实验结果证明了该方案的可行性。

关键词 测量与计量;光纤传感器;布里渊散射;电光调制;相干检测

中图分类号 TN 247;TP 212.14 **文献标识码** A

Detection of Spontaneous Brillouin Backscattered Power in Distributed Optical Fiber Sensor System Based on High Frequency Microwave Technology

SUN An, CHEN Jia-lin, LI Guo-yang, WANG Li, CHANG Li-ping, LIN Zun-qi

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

Abstract The technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing has been presented. Optical heterodyne detection was used to detect the weak Brillouin back scattering signal based on single longitudinal mode distributed feedback (DFB) laser and electric optical modulation technique. The scattering signal was amplified effectively by improving the filter and erbium doped fiber amplifier (EDFA). The 11 GHz radio-frequency (RF) signal of Brillouin back scattering is gathered and averaged. The experimental procedures and results are presented. The results show that the peak power of Brillouin back scattering at 11 GHz can reach 50 mV, and the intensity noise of light source induced the system's signal to noise ratio (SNR) decreased greatly, which reduced the difficulty of signal process in demodulation system. The experimental results confirm that the configuration is feasible.

Key words measurement and metrology; optical fiber sensors; Brillouin scattering; electro-optical modulation; optical coherent detection

1 引言

光纤传感作为一种新兴的传感技术,是目前传感领域里的一个研究热点^[1~3],具有探测距离长、抗辐射、抗电磁干扰性;体积小、重量轻、易弯曲,耐高温、高压、腐蚀等一系列优点,因此能够应用于各种大型建筑,工业领域温度、应变的变形监测和结构健康诊断中^[4~6],具有广泛的市场前景。

在基于布里渊散射的分布式光纤传感系统中,由于布里渊频移很小,只有11 GHz左右,产生的散射脉冲功率仅为纳瓦级^[7],这就要求激光器要有高频率稳定性和窄线宽,且对光滤波器、放大器及信号检测也有极高的要求。此外,光的偏振对系统的性能有极大的影响,必须采取扰偏或偏振控制措施,这些都对光纤传感系统的实际应用造成相当的难度。

收稿日期:2006-08-11;收到修改稿日期:2006-10-25

基金项目:上海市科委光科技专项(05DZ22007)资助课题。

作者简介:孙安(1978—),男,新疆石河子市人,博士研究生,研究方向为光纤传感技术。E-mail: a. sun@siom. ac. cn

导师简介:林尊琪(1942—),男,广东潮阳人,中国科学院院士,研究方向为高功率激光物理。E-mail: zqlin@mail. shcnc. ac. cn

本文采用自行研制的单纵模分布反馈(DFB)光纤激光器,结合窄带滤波放大及高频微波检测技术,实现对光纤传感器后向布里渊散射信号在高频段直接处理、显示,避免采用高成本单纵模半导体激光器,省去了将高频信号进混频、滤波放大等造成信号劣化缺点过程。该方案简化传感系统,降低成本,且信号质量好,有效改善了传感系统信噪比(SNR)。

2 原 理

布里渊散射是由光纤材料密度周期性变化引起的,光纤中抽运光与声子间相互作用,以光速传播的某一频率为 ν 的入射光子能产生一个沿相反方向传播的光子,即一个斯托克斯光子。斯托克斯光子与入射光子的频率差大约为11 GHz左右。

布里渊散射分布式光纤传感器主要利用光纤非线性效应中的布里渊后向散射信号实现传感测量,当入射到光纤的光功率达到布里渊散射阈值时,就产生后向布里渊散射光信号。布里渊散射同时受应变和温度的影响,当光纤沿线的温度发生变化或者存在轴向应变时,光纤中的背向布里渊散射光的频率、强度将发生改变,频率的漂移量及强度变化与光纤应变和温度的变化呈良好的线性关系,因此通过分析从传感光纤来的布里渊散射光的频移和强度,便可得到沿光纤分布的温度和应变变化。

光纤中布里渊散射光的频移和强度是温度和应变的函数。其中布里渊频移 ν_B 和温度 T ,应力 ϵ 的关系为^[8,9]

$$\nu_B(\epsilon) = \nu_B(0)(1 + C_\epsilon\epsilon), \quad (1)$$

$$\nu_B(T) = \nu_B(T_r)[1 + C_T(T - T_r)], \quad (2)$$

式中 T_r 为参考温度, $C_\epsilon = 4.5$, $C_T = 9.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,分别为应力和温度的比例系数。对于 $T = 300 \text{ K}$,光波长工作在 $\lambda = 1553.8 \text{ nm}$ 的普通单模光纤,有

$$\delta\nu_B = C_{\nu_\epsilon}\delta_\epsilon + C_{\nu_T}\delta_T, \quad (3)$$

式中 C_{ν_ϵ} 和 C_{ν_T} 分别为布里渊散射应变系数和温度系数, $C_{\nu_\epsilon} = 0.0483 \pm 0.0004 \text{ MHz}/\mu\epsilon$, $C_{\nu_T} = 1.10 \pm 0.02 \text{ MHz/K}$, δ_ϵ 和 δ_T 分别为由应变和温度引起的布里渊频移变化量。

布里渊散射光功率 P_B 和温度 T ,应力 ϵ 的关系为

$$P_B = \frac{k_1 P_R}{k_2(1 + 5.75\epsilon) - 1}, \quad (4)$$

$$P_B = \frac{AT}{\nu_B^2}, \quad (5)$$

式中 P_R 为瑞利散射系数, A , k_1 和 k_2 都为和应力、温

度无关的因子。对于 $T = 300 \text{ K}$,光波长工作在 $\lambda = 1553.8 \text{ nm}$ 的普通单模光纤,后向散射信号功率的应力和温度比例系数分别为 $C_{\rho_\epsilon} = -9.0 \times 10^{-6} \text{ \%}/\mu\epsilon$, $C_{\rho_T} = 3.2 \times 10^{-3} \text{ \%}/\text{K}$,因此通过检测传感光纤的布里渊散射频移和光功率,可得沿光纤一维分布的应力或温度。

目前对后向散射布里渊信号的检测主要是通过相干检测,采用一束连续本振光与后向散射光相干混频,由于布里渊频移大约在11 GHz左右,因此通过光电探测可得到对应于布里渊频移的高频微波信号。

3 实验及结果分析

采用光相干方法来检测布里渊散射分布式光纤传感器中的散射光信号,采用分布反馈光纤激光器结合电光调制器(EOM)及光纤放大系统产生窄带高功率激光脉冲及本振参考光,再和后向布里渊散射光进行光相干检测。对布里渊散射来说,必须采用谱宽远小于布里渊增益谱宽的光源,否则会降低布里渊增益峰值,此外光源谱宽越小,对温度和应变分辨率会相应提高^[10]。对于普通单模光纤中,布里渊增益谱宽一般在几十兆赫左右。传感系统所使用的分布反馈单纵模光栅由实验室自制,分布反馈激光器结构如图1所示,其中LD为激光二极管,WDM为波分复用器。该激光器输出波长为1550 nm左右,其输出激光线宽仅为几十千赫兹,最大输出功率大于10 mW。

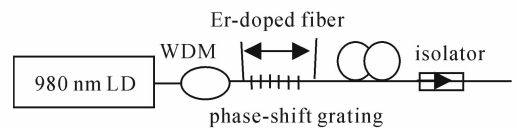


图1 光纤分布反馈激光器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of structure of single longitudinal mode DFB laser

实验系统如图2所示,分布反馈激光输出通过95:5光纤耦合器进行光功率分配,5%的一路光作为本地参考光,95%输出的一路光作为激励光用于脉冲调制。由于电光调制器为偏振相关器件,所以需经过光纤偏振控制器(PC)调整输出激光偏振态然后才可进入电光调制器,否则会导致调制器输出激光的消光比小,无法对脉冲进行有效放大。经偏振控制后的激光进入电光调制器后,其消光比经测量可达到30 dB,很好地满足了实际传感系统需要。由

于分布反馈激光器输出功率大于10 mW,因此只需要对激光器调制后的脉冲进行单级放大,便可满足传感系统对激光脉冲的功率要求。

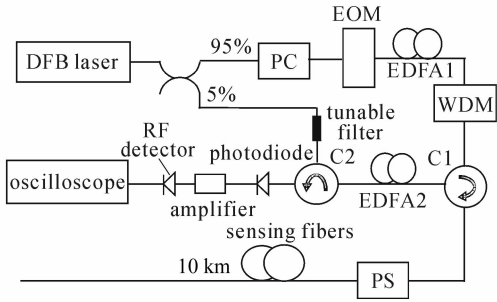


图 2 基于微波技术实现光纤后向布里渊散射信号检测实验原理图

Fig. 2 Experimental arrangement for measuring Brillouin back scattering signal using microwave detection system

脉宽为 20 ns, 重复频率为2 kHz脉冲经过掺铒光纤放大器 (EDFA1) 放大, 其峰值功率达到 150 mW. 放大后的激光脉冲再通过波分复用, 滤掉掺铒光纤放大器产生的放大自发辐射 (ASE) 噪声, 最后由环形器 (C1) 通过退偏器 (PS) 输入到 10 km 的普通单模光纤, 从环形器出来的传感光纤布里渊散射光, 再经环形器 (C2) 与本地参考光进行相干, 然后通过 12 GHz 高速光电探测器进行检测, 得到后向布里渊散射信号。

由于后向散射的布里渊信号非常微弱, 对于 10 mW, 100 ns 的抽运脉冲, 布里渊散射信号的功率为 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ nW^[4], 因而对于本实验所采用的激光脉冲光源, 后向散射光仅为几个纳瓦, 很难直接检测。因此实验采用两步提高信号质量: 首先采用放大器 EDFA2 放大后向散射信号, 由于后向散射信号非常微弱, 为降低光纤放大器放大自发辐射噪声对后向散射光影响, 提高信号光信噪比, 对放大器 EDFA2 采用分级放大结构。采用短掺铒光纤对信号光初步放大, 由于掺铒光纤较短, 因而产生的放大自发辐射噪声相对较小, 然后通过窄带滤波器进行滤波, 再进入第二级光纤放大器; 最后出来的布里渊后向散射信号光再通过自制的窄带可调谐光纤光栅滤波器, 其带宽为 0.09 nm, 波长分辨率可达 0.01 nm, 可有效地从瑞利散射和放大自发辐射中提取出布里渊散射信号。通过对放大器的设计、改进, 可避免直接采用大功率单级放大器造成的基底噪声较高, 有效提高信噪比。实验结果证明, 通过检波器测试所得后向散射信号大于 50 mV, 而基底噪

声小于 2 mV (示波器分辨率约为 2 mV)。

由于布里渊后向散射信号经放大也仅为微瓦级, 信号仍十分微弱, 因此必须采用进一步放大措施。该方案采用高速光电探测器前置放大实现对信号进行放大, 最后通过高频检波管对 11 GHz 高频微波脉冲信号进行检测, 并通过示波器对信号进行观察。由于后向散射信号所含噪声很大, 因此实验采用采样累加处理, 采样平均 2^8 后, 信号如图 3 所示。可以看出, 检波器所测布里渊信号强度为 50 mV 左右, 随着光纤长度增加, 信号逐渐衰减, 即使在光纤末端, 散射信号强度仍有 20 mV 左右。

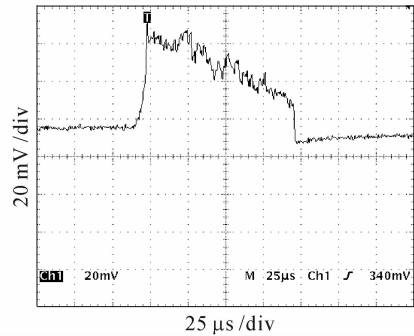


图 3 通过外差相干实现布里渊散射信号检测所得射频信号

Fig. 3 Radio frequency wave of Brillouin scattering signal using heterodyne detecting

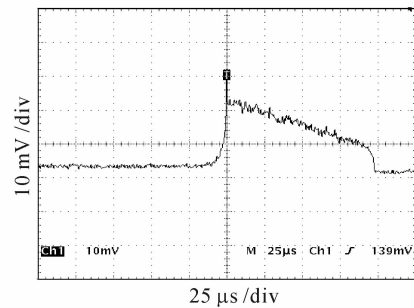


图 4 采用扰偏技术后布里渊散射信号图

Fig. 4 Radio frequency wave of Brillouin scattering signal using polarization scrambler

从图 3 可知, 信号本身噪声起伏比较大, 初步判断为系统偏振噪声。启动退偏器后, 再次对布里渊后向散射信号进行探测采集, 实验结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 采用退偏措施后, 信号噪声明显下降, 曲线比较平滑。退偏后布里渊散射强度略有下降, 但信号仍有 10~15 mV 左右。目前很多方案采用二次混频, 将信号频率降低到 1 GHz 左右, 而混频过程对信号衰减很大, 因此需要进行再次放大。无论进行二次混频或者直接采集, 该方案均能满足需

要,可明显降低后续过程的技术难度。

4 结 论

在研究布里渊散射分布式光纤传感原理基础上,采用自行研制的分布反馈光纤激光器,通过改进光纤放大器、滤波器及相干检测系统,对布里渊微弱后向散射信号进行有效放大提取,实现对11 GHz的微弱高频信号直接采集显示。经处理后的信号强度较大,经检波管探测信号输出可达50 mV。这对后继方案采用二次混频或信号的直接处理显示,提高信号信噪比,降低成本,具有一定意义。

参 考 文 献

- 1 Sun An, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. The experimental study of large range enhanced temperature sensitivity concerning fiber Bragg grating temperature sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11):1491~1493
孙安,乔学光,贾振安等. 大范围光纤布拉格光栅温度传感器增敏实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11):1491~1493
- 2 Sun An, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Temperature and pressure responsive characteristics of polymer packaged fiber Bragg grating with large dynamic range [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):224~227
孙安,乔学光,贾振安等. 聚合物封装光纤布拉格光栅传感器温度压力特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):224~227
- 3 Wang Wei, Zhou Bangquan, Zhang Zaixuan *et al.*. Temperature measurement accuracy of the distributed optical fiber Raman photons temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1):100~105
王伟,周邦全,张在宣等. 分布型光纤拉曼光子温度传感器系统的测温精度[J]. *光学学报*, 1999, **19**(1):100~105
- 4 Song Muping. The technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8):999~1003
宋牟平. 微波光电调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8):999~1003
- 5 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. A high-sensitivity in fiber Bragg grating pressure sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):187~189
傅海威,乔学光,贾振安等. 高灵敏度的光纤光栅压强传感器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):187~189
- 6 Zhang Na, Feng Xia. Using of fiber optical sensor to measure liquid parameters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):67~71
张娜,冯霞. 光纤传感器在液体参量测量中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):67~71
- 7 T. Horiguchi, M. Tateda. BOTDA nondestructive measurement of single mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(8):1170~1176
- 8 H. Naruse, M. Tateda, H. Ohno *et al.*. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum [C]. 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002, **1**:305~308
- 9 T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Ohno *et al.*. Starin and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques [C]. ECOC'98, Madrid, Spain, 1998. 149~150
- 10 W. B. Anthony, D. D. Micheal, Xiaoyi Bao *et al.*. Precision of a Brillouin scattering based distributed strain sensor [C]. *SPIE*, 1999, **3670**:359~365