

基于光纤光栅的布里渊光时域反射传感系统参考光的稳定性

王锦荣¹ 付兴虎^{1,2} 付广伟^{1,2} 张旭¹ 张汇洋¹ 毕卫红^{1,2}

(¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004
²河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 基于布里渊光时域反射(BOTDR)分布式光纤传感系统通常采用光相干外差检测获得自发布里渊散射信号,弥补了直接检测信号弱的不足。该系统通过微波源调制铌酸锂电光强度调制器来获得具有布里渊频移、信噪比(SNR)最大的1阶光波,然而由于电光强度调制器受到多个因素影响,导致参考光中1阶光波与后向散射光相干后的布里渊信号信噪比较差。因此,提出采用光纤布拉格光栅(FBG)对参考光进行滤波,分析了参考光波长较长1阶光波的信噪比变化,通过实验获得了高信噪比、高稳定性的参考光,并得到了高信噪比的布里渊相干信号,证明了此方案的可行性。

关键词 光纤光学;相干外差;光纤光栅;微波电光调制;布里渊光时域反射

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.s205004

Stability of Reference Light Based on Fiber Bragg Grating in Brillouin Optical Time Domain Reflectometer System

Wang Jinrong¹ Fu Xinghu^{1,2} Fu Guangwei^{1,2} Zhang Xu¹
Zhang Huiyang¹ Bi Weihong^{1,2}

(¹College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)
²Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract In Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR) sensing system, it adopts optical coherent heterodyne detection to obtain spontaneous Brillouin scattering signal, making up for the lack of weak signal in direct detection. The system obtains the first-order optical wave of Brillouin frequency shift and the largest signal to noise ratio (SNR) with modulating LiNbO₃ electro-optic intensity modulator by microwave source. But electro-optic intensity modulator is affected by many factors, resulting that SNR with the first-order optical wave of the reference light is low, which is heterodyne with the back Brillouin scattering light. Therefore, a new method of filtering reference light by fiber Bragg grating (FBG) is proposed, and the variation of SNR with the first-order side is analyzed. The experimental results show that the stable output of the first-order optical wave in a long time and Brillouin coherent signal with the maximum SNR can be obtained. The feasibility of the scheme is proved.

Key words fiber optics; optical coherent heterodyne detection; fiber grating; microwave electro-optic modulator; Brillouin optical time domain reflectometer

OCIS codes 060.2310; 290.5830; 030.1670; 280.4788

收稿日期: 2012-05-24; 收到修改稿日期: 2012-07-03

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327800)、中国博士后科学基金(2012M510767)和河北省科学技术研究与发展计划(10213509D)资助课题。

作者简介: 王锦荣(1987—),男,硕士研究生,主要从事分布式光纤传感方面的研究。

E-mail: ysuwjrr@stumail.ysu.edu.cn

导师简介: 毕卫红(1960—),女,博士,教授,主要从事光纤传感、光纤通信及光电检测等方面的研究。

E-mail: bwhong@ysu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

基于布里渊效应的分布式光纤传感技术^[1~5]具有可测多个物理量(如温度、应变和光纤损耗等)、空间分辨率高、传感距离长、测量精度高等优点^[6,7],近年来倍受关注。布里渊光时域反射(BOTDR)技术是利用传感光纤中的自发布里渊散射光,传感距离长,但其信号微弱,一般比入射光强度小6~8个数量级,因此,本文通常采用光相干检测实现测量^[8~11]。在光相干检测中,基于微波外差相干探测^[12]和光学声光移频环路^[13]的BOTDR技术都增加了系统设计的难度,因此,采用基于电光移频技术实现BOTDR分布式光纤传感系统的参考光调制,利用微波电光调制^[14]产生具有布里渊频移的参考光,并与传感光纤的后向散射光相干,实现自发布里渊散射信号的提取。参考光通过铌酸锂波导电光强

度调制器(EOIM)^[15]获得了相对强度大、信噪比(SNR)高的具有布里渊频移的1阶光波。然而参考光中0阶光波和1阶光波的不稳定性使得参考光中1阶光波的信噪比降低,严重影响了系统的测量精度。

2 基本原理

利用微波源调制铌酸锂电光强度调制器获得1阶光波信噪比最大的参考光,然后经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大和光纤布拉格光栅(FBG)滤波,与自发布里渊散射光进行光相干外差检测,实验系统构成如图1所示。图中,DFB-LD是分布反馈半导体激光器,PC是偏振控制器,EOM是电光调制器,PS是扰偏器,PD是光电探测器。扰偏器的作用是减弱偏振噪声。FBG1、FBG2的中心波长为1550.43 nm,3 dB带宽为0.1 nm,反射率为80%。

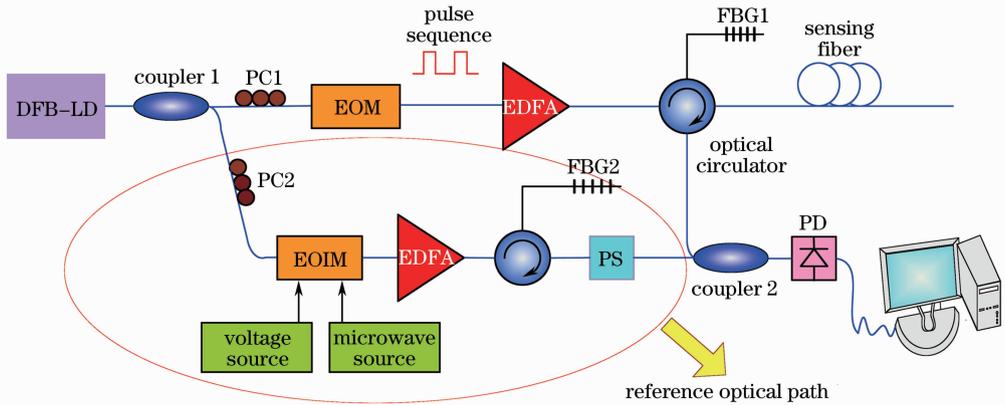


图1 实验系统框图

Fig. 1 Configuration of experimental system

系统工作原理如下:光源发出的连续光经耦合器分为两路,即探测光路和参考光路。在探测光路中,探测光被调制成脉冲光后,经EDFA放大,通过光环行器注入到传感光纤中,产生的背向散射光经过FBG1滤波,得到斯托克斯布里渊散射光;在参考光路中,参考光经微波电光调制后,通过EDFA放

大和FBG2滤波,与探测光路反射回来的布里渊散射光相干。在参考光路中,连续光经EOM和微波源射频信号调制,产生1阶光波,调节直流偏置电压和PC2使0阶光波尽可能小,1阶光波尽可能大,如图2所示。

由于光电探测器本身探测频率受限,只能探测

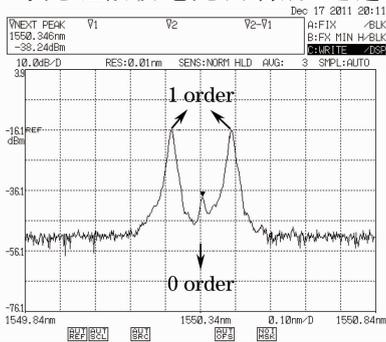


图2 经电光强度调制器调制后的参考光
Fig. 2 Reference optical signal by EOM

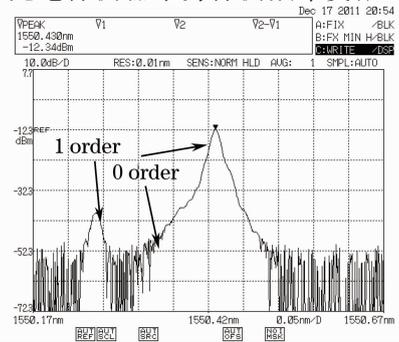


图3 经EDFA放大FBG2滤波后的参考光
Fig. 3 Reference optical signal by EDFA and FBG2

到斯托克斯布里渊散射光与波长较长的 1 阶光波相干后的光信号,因此,FBG2 只需要使得参考光中波长较长的 1 阶光波尽可能大,0 阶光波尽可能小,如图 3 所示。

3 实验结果分析

3.1 滤波前波长较长 1 阶光波信噪比的变化

在参考光路中,用光谱仪测量 EOIM 的输出光。每次总测量时间为 30 min,测量前需将参考光

的 1 阶光波信噪比调至最大,测量时间间隔为 1 min,分别记录图 2 中 0 阶、波长较长 1 阶光波峰值功率;实验重复测量 3 次,其结果如图 4 所示。将每次测量中的最大值与最小值记入表 1 进行比较。

由图 4、表 1 可以看出,0 阶光波以 0.508 dB/min 的速率随时间近似呈线性递增的趋势,波长较长 1 阶光波以 0.007 dB/min 的速率在最大值与最小值之间起伏变化,因此,参考光中波长较长 1 阶光波的信噪比随时间的推移而逐渐变小,如图 5 所示。

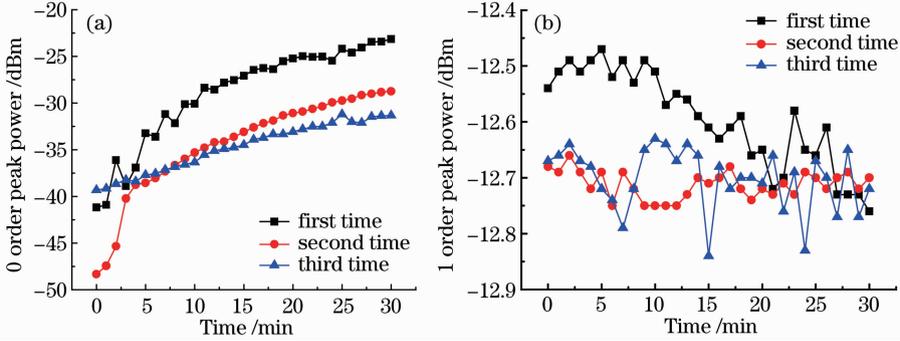


图 4 光波峰值功率随时间变化曲线。(a) 0 阶;(b) 1 阶

Fig. 4 Optical peak power versus time. (a) 0 order; (b) 1 order

表 1 0 阶、1 阶光波峰值功率变化率比较

Table 1 Compared on the change rate of optical peak power of 0 order and 1 order

Time	Maximum /dBm	Minimum /dBm	Change rate /(dB/min)	Average change rate /(dB/min)	
0 order	1	-23.14	-41.18	0.601	0.508
	2	-28.73	-48.32	0.653	
	3	-31.19	-39.32	0.271	
1 order	1	-12.47	-12.76	0.010	0.007
	2	-12.66	-12.75	0.003	
	3	-12.63	-12.84	0.007	

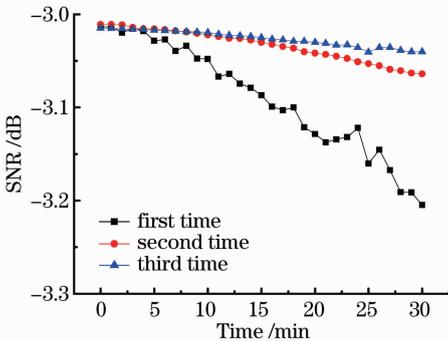


图 5 滤波前 1 阶光波的信噪比随时间变化曲线

Fig. 5 SNR of 1 order versus time before filtering

3.2 滤波后波长较长 1 阶光波信噪比的变化

在参考光路中,EOIM 的输出光经过 EDFA 放大和 FBG2 滤波后,用光谱仪进行测量。按照滤波前的测量方法进行,记录图 3 中 0 阶、波长较长 1 阶光波峰值功率,计算得到波长较长 1 阶光波的信噪

比变化曲线如图 6 所示。

对比图 5、图 6 可得,直接测量 EOIM 的输出光谱时,波长较长 1 阶光波的信噪比下降明显,而对参考光放大并滤波后,信噪比基本上保持在 -0.0053 dB。

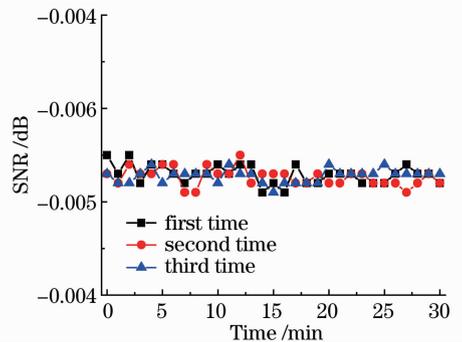


图 6 滤波后 1 阶光波的信噪比随时间变化曲线

Fig. 6 SNR of 1 order versus time after filtering

3.3 滤波前后布里渊时域信号的比较

滤波前,当参考光中波长较长 1 阶光波的信噪比为 -3.0214 dB 时,采集的布里渊时域信号如图 7(a)所示。滤波后,当参考光中波长较长 1 阶光波的信噪比为 -0.0053 dB 时,采集的布里渊时域信号如图 7(b)所示。表 2 比较了滤波前后光纤不

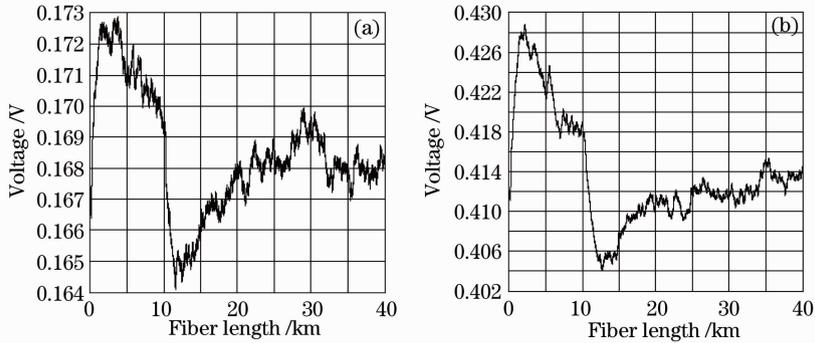


图 7 布里渊时域信号图。(a)参考光滤波前;(b)参考光滤波后

Fig. 7 Brillouin time domain signals. (a) Before filtering reference; (b) after filtering reference

表 2 滤波前后光纤不同位置处布里渊信号信噪比的比较

Table 2 Compared on SNR of the Brillouin signals of different locations before and after filtering

SNR of 1 order /dB	Fiber location /km	SNR of Brillouin signal /dB
-3.0214	3	50.76
	5	50.68
	7	50.65
-0.0053	3	58.63
	5	58.53
	7	58.44

4 结 论

在光相干外差布里渊传感系统中,利用铌酸锂 EOIM 可获得信噪比最大的 1 阶光波,但由于受电源和手动偏振控制器以及外界环境等因素的影响,不能长时间保持 1 阶光波信噪比最大。通过对铌酸锂 EOIM 输出光进行放大并滤波,使得输出光中波长较长 1 阶光波的信噪比长时间保持稳定,大大提高了布里渊信号的信噪比,从而提高了系统的测量精度。

参 考 文 献

- 1 Song Muping, Zhuang Baiyun. Study on polarization-induced fading eliminated technique in Brillouin optical time-domain analysis sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 711~715
宋牟平, 庄白云. 布里渊光时域分析传感器的消偏振衰落技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 711~715
- 2 T. Horiguchi, M. Tateda. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using

同位置处布里渊信号的信噪比。

由图 7、表 2 可得,参考光滤波后,不同光纤位置处布里渊信号的信噪比与滤波前相比,增加了大约 8 dB,从而有效改善了系统中温度、应变的测量精度和空间分辨率,增加了传感光纤的测量长度。

- Brillouin interaction; theory[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(8): 1170~1176
- 3 H. Liang, W. Li, N. Linze *et al.*. High-resolution DPP-BOTDA over 50 km LEAF using return-to-zero coded pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(10): 1503~1505
- 4 Song Muping, Bao Chong, Qiu Chao *et al.*. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 650~654
宋牟平, 鲍 翀, 裘 超等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射的分布式光纤传感器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 650~654
- 5 D. Garus, K. Krebber, F. Schliep. Distributed sensing technique based on Brillouin optical fiber frequency domain analysis[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1402~1404
- 6 X. Bao, L. Chen. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensor*, 2011, **11**(4): 4152~4187
- 7 M. A. Soto, G. Bolognini, F. D. Pasquale *et al.*. Simplex-code BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(2): 259~261
- 8 Sun An, Chen Jialin, Li Guoyang *et al.*. Detection of spontaneous Brillouin backscattered power in distributed optical fiber sensor system based on high frequency microwave technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 503~506
孙 安, 陈嘉琳, 李国扬等. 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[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 503~506
- 9 Su Liqin, Shen Yonghang. Investigation on a novel Fabry-Perot filter for high power tunable fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2351~2354
苏立钦, 沈永行. 适用于高功率可调谐光纤激光器的法布里-珀罗滤波器的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2351~2354
- 10 Lu Huaiwei, Zhang Baoge, Wu Kaijun *et al.*. Design of all-fiber interleaver with unequal passband based on cascaded Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2406~2411
鲁怀伟, 章宝歌, 邹开俊等. 级联马赫-曾德尔干涉仪型不等带宽交错滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2406~2411
- 11 Bi Weihong, Liu Yin. Experiment research of multi-wavelength optical source based on the electro-optic intensity modulator of Mach-Zehnder[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(7):

7~12

毕卫红, 刘 银. Mach-Zehnder 电光调制器产生多波长光源的实验研究[J]. 光电工程, 2011, **38**(7): 7~12

- 12 S. M. Maughan, H. H. Kee, T. P. Newson. A calibrated 27-km distributed fiber temperature sensor based on microwave heterodyne detection of spontaneous Brillouin backscatter power [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 511~513
- 13 K. Shimizu, T. Horiguchi, Y. Koyamada *et al.*. Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(5): 730~736

- 14 Song Muping. The technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114
宋牟平. 微波电光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): 1111~1114
- 15 Zhou Huijuan, Meng Zhou, Liao Yi. Frequency shift characteristics analysis of LiNbO₃ waveguide electro-optic intensity modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 901~905
周会娟, 孟 洲, 廖 毅. 铌酸锂波导电光强度调制器的移频特性[J]. 中国激光, 2009, **36**(4): 901~905

栏目编辑: 王晓琪