

# 用于布里渊分布式光纤传感的光学锁频系统

彭交波<sup>1,2</sup> 卞正兰<sup>1,2</sup> 郝蕴琦<sup>1,2</sup> 陈迪俊<sup>1</sup> 叶青<sup>1</sup> 蔡海文<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 报道了一种用于布里渊分布式光纤传感器(DOFS)的高稳定光学锁频系统。一台波长为 1550 nm 的半导体分布反馈(DFB)激光器作为主激光器用于光纤传感探测,另一台同样的激光器作为从激光器,采用光学锁相的方法将其与主激光器进行频率跟踪,使主激光器与从激光器频率差恒定为 11 GHz。利用该光源搭建基于自发布里渊的分布式光纤传感系统(BOTDR),可以有效地实现宽带移频,使得探测解调频率降低到百兆赫兹量级,大大降低了探测的噪声,并且降低了 BOTDR 系统成本。结果表明,采用此光源方案的频率波动范围为 $\pm 1$  MHz。

**关键词** 激光器;布里渊散射;分布式传感;光学锁相;相频检测器

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0705001

## Frequency Locking of Two DFB Lasers for Distributed Optical Fiber Sensing Applications

Peng Jiaobo<sup>1,2</sup> Bian Zhenglan<sup>1,2</sup> Hao Yunqi<sup>1,2</sup> Chen Dijun<sup>1</sup> Ye Qing<sup>1</sup> Cai Haiwen<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A high frequency-stable laser source for Brillouin distributed optical fiber sensor (DOFS) is reported. A distributed-feedback (DFB) laser is used as the master laser for optical fiber sensor measurement. Another DFB laser is used as the slave laser of which the frequency is tracked with the master laser. Thus the frequency difference of the two lasers can be locked at 11 GHz. With this source for distributed optical fiber sensing applications, the frequency of the beat frequency signal is only several million hertz. As a result, the noise can be decreased and the cost of the equipment will be reduced. The results indicate that the range of frequency is  $\pm 1$  MHz.

**Key words** lasers; Brillouin scattering; distributed sensing; optical phase-locked loops; phase/frequency detector

**OCIS codes** 060.2370; 140.5960; 140.3518

## 1 引 言

分布式光纤传感器是目前国内传感领域研究的热点,具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强、电绝缘性能好、化学稳定性好、长距离分布式探测等优点,能够用于各种大型建筑和工业领域的温度与应变监测,具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。基于布里渊分布式光纤传感器具有重量轻、结构紧凑,可以在各种危险环境中应用,实现分布式传感,对电磁干扰免疫,并且抗化学腐蚀,在大多数情况下具有低生产成本的潜

力并且可以连续地分布式监控沿着传感光纤的温度和应力等优势<sup>[2]</sup>,被用于石油管道,电力电缆等的压力和温度监测,在最近几十年引起了人们的广泛兴趣<sup>[3,4]</sup>。基于布里渊的传感技术主要分为两种:布里渊时域分析技术<sup>[5]</sup>(BOTDA)和布里渊时域反射技术<sup>[6]</sup>(BOTDR)的分布式传感技术。两种技术都是根据布里渊频移同温度或应力的线性关系<sup>[7,8]</sup>。根据布里渊频移同温度或应力的线性关系,可通过布里渊频移的变化得到对应的温度或应变信息。不

收稿日期: 2012-03-23; 收到修改稿日期: 2012-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(61108028,61178031)和国家自然科学基金(NSAF 联合)基金(11076028)资助课题。

作者简介: 彭交波(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学锁相电路方面的研究。E-mail: jiaobo\_peng@163.com

导师简介: 蔡海文(1975—),男,研究员,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: hwcai@siom.ac.cn(通信联系人)

同于 BOTDA 技术中采用的双向传输的方法, BOTDR 技术更具吸引力,它只需单端入射便可以同时进行温度和应变传感<sup>[9]</sup>。

BOTDR 探测方案包括直接探测和相干探测。与直接探测相比,相干探测具有更高的灵敏度和动态范围。和注入光的频率相比,布里渊散射信号的频率降低了约 11 GHz。如果将相干探测中的探测光作为本地振荡器,布里渊散射信号和本地振荡器的拍频信号的频率约为 11 GHz<sup>[10]</sup>,位于最常用的传统外差接收器的带宽之外。这种相干探测需要一个带宽为 11 GHz 的微波探测器,价格昂贵而且会带来很高的噪声。若将本地光宽带移频,其移频大小和布里渊频率接近(9~12 GHz),就可以使用低射频带宽的探测器来探测。与传统方法相比,这种方法有更高的灵敏度、更低的噪声,并节省了相当大的成本。

在这种情况下,通常采用的方法是用一个激光器,然后使用电光调制(EOM)或声光调制(AOM)的方法得到实验所需要的频率。但是,当需要的频率差特别大或者需要很大的调谐范围时,这两种方法就不可能实现。控制两个激光器的拍频频率可以通过偏移锁定<sup>[6]</sup>或光学锁相<sup>[11]</sup>的方法来实现。在这些情况下,可以使用光学锁相的方法来稳定两个

激光器的相对频率。一个激光器作为主激光器(SL),另外一个激光器作为从激光器(ML),从激光器使用光学锁相环<sup>[12]</sup>(OPLL)使其相位和主激光器同步,两个激光器的频率差可通过调整本地振荡器<sup>[12,13]</sup>来获得。本文主要讲述的是采用光学锁相的方法,使相干探测中的本地激光器和用于布里渊传感的探测激光器频率锁定,且频率差为 11 GHz,然后用本地激光器和布里渊散射光进行拍频,就可以得到频率仅为百兆赫兹量级的拍频信号。

## 2 实验设计

分布式光纤布里渊传感以及锁相的实验方案如图 1 所示(彩图请见网络电子版)。主激光器作为布里渊光纤传感的探测光,通过电光调制器调制成重复频率 4 kHz、脉冲宽度 100 ns 的脉冲光,注入到传感光纤后产生后向自发布里渊散射光,其频率差与主激光器频率差约为 11 GHz。从激光器作为本地光,和布里渊背向散射光进行相干拍频,干涉信号经过双平衡探测器(DB-PD)探测,转化为电信号。电信号经过微波放大(MWA)后,数据采集卡采集相关信息,数据处理得到不同光纤位置处拍频信号的波动,可进行温度或应力的传感。图中 N,R 表示计数器,PD 为光电探测器,PID 为比例积分微分控制器。

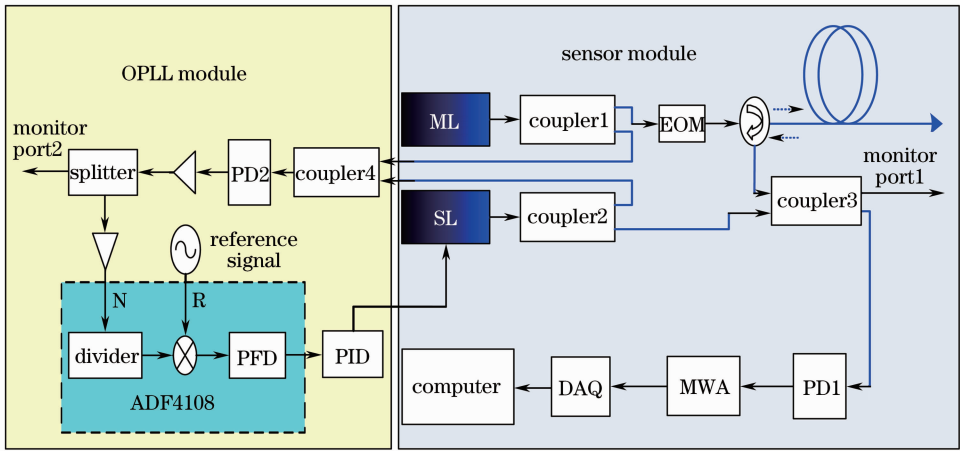


图 1 光纤布里渊传感相干探测和光学锁相装置结构框图(绿线表示光路,黑线表示电气连接)

Fig. 1 Coherent detection block diagram of distributed optical fiber sensing and setup of the optical phase locked loop (the green line shows the light path, the black line shows the electrical path)

为了使拍频信号的频率位于带宽范围(小于 800 MHz)的探测器的带宽内,本地激光器与探测激光器的频率差需为 11 GHz。使用光学锁相环路,使从激光器与主激光器的频率差锁定在 11 GHz,以便在 BOTDR 中实现宽带移频,降低信号的探测及解调难度。图 1 中黄色部分为锁定两个激光器频率的

光学锁相环路装置。主激光器为 1550 nm 波段的半导体分布反馈(DFB)激光器(FRL 15DCWD-A81-19340-C),功率为 40 mW,3 dB 线宽为 1 MHz。从激光器为 1550 nm 波段的半导体 DFB 激光器(WLSL-934012C1424-42),功率为 10 mW,3 dB 线宽为 3 MHz。主激光器通过一个 10:90 耦合器,

其中 10% 的光功率用于锁频,其余 90% 功率分做光纤传感的探测光。从激光器通过一个 50:50 耦合器,其中 50% 的光功率用于锁频,其余 50% 光功率分做相干探测的本地光。两个激光器的分光经过一个 50:50 的光纤耦合器进行拍频,输入到一个 12 GHz 的超快 PIN 光电探测器 (LR-12-A-M) 中 (在 1550 nm 处响应率为 0.85 A/W)。探测到的拍频信号,其中大约 -10 dBm 的信号经过功分器输出用来监控频率波动,其余的拍频信号都输入到数字频率合成器 (ADF4108) 中,ADF4108 由两个可编程的计数器和一个低噪声数字相频检测器 (PFD) 组成。可以通过 FPGA 来编程改变计数器 R 和 N 的数值,PFD 比较参考信号通过可编程计数器 R 分频和拍频信号通过可编程计数器 N 分频的频率,然后产生正比于参考信号和拍频信号频率差的误差信号,通过模拟 PID 伺服系统根据误差信号来控制从激光器的电流,从而改变从激光器的频率,实现将两个激光器的频率锁定在一个固定值上。在实现光学锁相环的情况下,可以将光探测器输出的微波拍频信号固定在 11 GHz。

### 3 实验结果

主激光器和从激光器拍频后的一部分光通过耦合器输入到光谱仪,以便监测两个激光器的光谱。通过光谱仪得到锁定条件下两个激光器的光谱如图 2 所示。从图 2 中可以看出,此时主激光器的波

长为 1550.338 nm,从激光器波长为 1550.426 nm,波长间隔为 0.088 nm,换算为频率差约为 11 GHz。

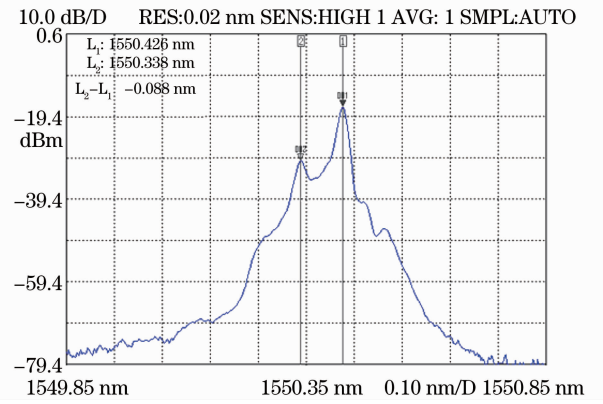


图 2 频率锁定时两个激光器的光谱图

Fig. 2 Spectra of the two lasers while frequency locking

将主激光器输出的激光输入到传感光纤,得到受激布里渊散射光。将返回的受激布里渊散射光和从激光器进行拍频,信号经过光电探测后微波放大,将得到的信号输入到频率计数器,得到频率波动情况,如图 3 所示。图 3(a) 表示锁定状态下受激布里渊散射光和从激光器的拍频信号的频率波动;图 3(b) 表示未锁定状态下受激布里渊散射光和从激光器的拍频信号的频率波动;图 3(c) 表示从未锁定状态到锁定状态受激布里渊散射光和从激光器的拍频信号的频率波动。由于在未锁定状态下,从激光器与主激光器的频率差只是被调到了 11 GHz 附近而不是精确的 11 GHz,因此锁定状态下和未锁定

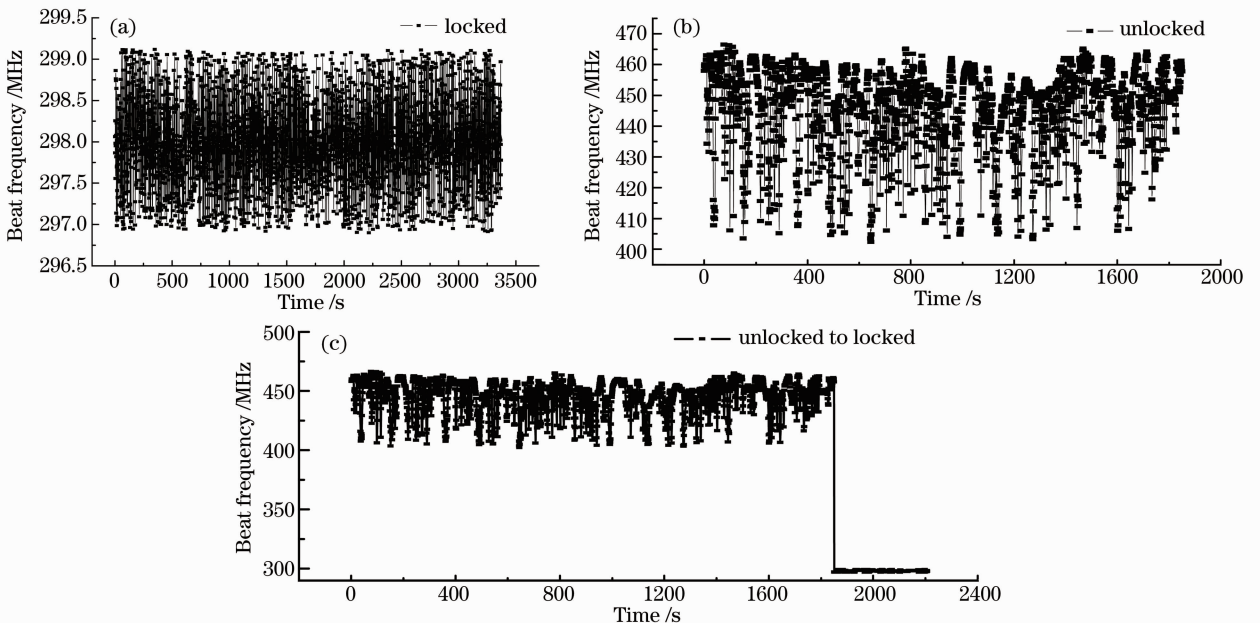


图 3 受激布里渊散射光和从激光器进行拍频信号的频率波动

Fig. 3 Frequency fluctuations of the beat signal of the stimulated Brillouin scattering light and the slave laser

状态下拍频信号的中心频率并不一致。从图中可以看出,锁定状态下,返回的受激布里渊散射光和从激光器进行拍频信号的频率波动大约为 2 MHz;未锁定状态下,返回的受激布里渊散射光和从激光器进行拍频信号的频率波动大约为 65 MHz。

在保持锁频的条件下,主激光器经过电光调制

后的脉冲光输入到传感光纤中,将返回的自发布里渊散射光和从激光器进行拍频并且将得到的拍频信号进行微波放大,通过数据采集卡得到的后向自发布里渊散射光和本地光拍频的中心频率分布图如图 4 所示,发现其中心频率在 298 MHz 附近以  $\pm 1$  MHz 的范围波动。

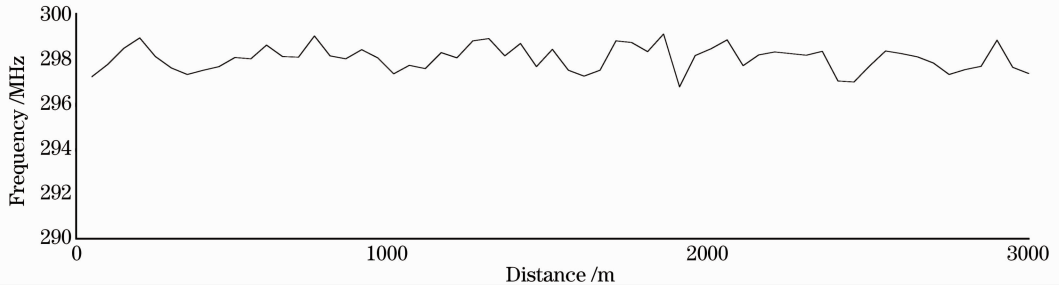


图 4 传感光纤的自发布里渊散射光和本地激光器拍频的中心频率分布

Fig. 4 Center frequency distribution of the beat signal of the spontaneous Brillouin scattering light and the local laser along the sensing fiber

## 4 结 论

使用基于 ADF4108 的光学锁相环系统将两个商用半导体 DFB 激光器锁频,让两个激光器的频率差保持恒定为 11 GHz,然后用来做 BOTDR 的光源。由于采用锁频的方法,强度稳定性更好,更利于温度和应变的同时传感。并且最后相干探测的自发布里渊散射光和本地光拍频的中心频率在 298 MHz 附近以  $\pm 1$  MHz 的范围波动。如果降低选用激光器的线宽或者提高锁频的性能会减少中心频率的波动,也就是能提高传感精度。这也是下一步的努力方向。

## 参 考 文 献

- 1 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[C]. Collection of Theses on High Power Laser and Plasma Physics, 2007, **5**(1): 233~236
- 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[C].高功率激光及等离子体物理研究论文集(专题),2007,**5**(1):233~236
- 2 M. Alahbabi, N. Lawrence, Y. Cho *et al.*. High spatial resolution microwave detection system for Brillouin based distributed detection of spontaneous Brillouin backscatter [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**(8): 1539~1543
- 3 T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, **1**(5): 107~108
- 4 D. Culverhouse, F. Farahi, C. N. Pannel *et al.*. Potential of

- stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(14): 913~915
- 5 X. Bao, D. J. Webb, D. A. Jackson. 22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7): 552~554
- 6 Y. Li, X. Bao, F. Ravet *et al.*. Distributed Brillouin sensor system based on offset locking of two distributed feedback lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(2): 99~102
- 7 T. Kurashima, T. Horiguchi, M. Tateda. Distributed temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(18): 1038~1040
- 8 F. Ravet, X. Bao, L. Zou *et al.*. Accurate strain detection and localization with the distributed Brillouin sensor based on a phenomenological signal processing approach[C]. *SPIE*, 2006, **6176**: 61761C
- 9 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
- 10 J. Geng, S. Staines, M. Blake *et al.*. Distributed fiber temperature and strain sensor using coherent radio-frequency detection of spontaneous Brillouin scattering [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(23): 5928~5932
- 11 Xu Nan, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Optical phase locked loops in inter-satellites coherent optical communications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **45**(4): 25~33
- 许楠,刘立人,刘德安等.星间相干光通信中的光学锁相环 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **45**(4): 25~33
- 12 J. Appel, A. Macrae, A. I. Lvovsky. A versatile digital GHz phase lock for external cavity diode lasers [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(5): 055302
- 13 A. M. Marino, C. R. Stroud. Phase-locked laser system for use in atomic coherence experiments [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, **79**(1): 013104