

文章编号: 0258-7025(2006)08-1073-05

基于线型腔拉曼光纤激光器的长距离 光纤布拉格光栅传感

张治国, 张 民, 叶培大

(北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 提出了一种基于线型腔拉曼光纤激光器的长距离分布式光纤布拉格光栅(FBG)传感解调系统,并进行了理论分析和实验验证。传感光纤布拉格光栅构成拉曼光纤激光器腔镜的一端,受一维调节器调节控制的匹配光纤布拉格光栅构成腔镜的另一端。一维调节器与步进电机相连,步进电机由计算机(PC)通过可编程逻辑控制器(PLC)进行控制,一维调节器通过调节匹配光纤布拉格光栅的周期来控制激光器的输出。实验结果表明,传感解调系统能很好地实现长距离分布式传感及传感信号的检测。30 km非归零色散位移光纤(NZDSF)用于拉曼增益可以产生信噪比大于40 dB的稳定拉曼激光输出,在4.2 nm范围内系统解调精度为0.05 nm。

关键词 光纤光学;传感器;线型腔拉曼光纤激光器;步进电机;非归零色散位移光纤

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

Long-Distance Fiber Bragg Grating Sensor System Based on Linear-Cavity Fiber Raman Laser

ZHANG Zhi-guo, ZHANG Min, YE Pei-da

(Key Laboratory of Optical Communication & Lightwave Technologies of Ministry of Education,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract A scheme of long-distance fiber Bragg grating (FBG) sensor system based on linear-cavity fiber Raman laser is proposed and demonstrated. The cavity of the laser consists of the sensing FBG and the tunable FBG, of which the Bragg period is tunable through a one-dimensional (1D) adjustor. The 1D adjustor, which is connected with a step motor that is controlled by a programmable logic controller (PLC), can control the Bragg period of the tunable FBG to match the Bragg period of the sensors, which decide the wavelength of the laser output. The tuning module, the optical/electrical circuit, the detecting-and-controlling system and the fiber Raman laser construct a close loop, which performs the wavelength demodulation. Experimental results show that the demodulation sensor system can accomplish sensing and detecting of long-distance distributed sensing signal. Signal-to-noise ratio of stable Raman laser output is greater than 40 dB with 30 km non-zero dispersion shifted fiber (NZDSF), and the precision of the proposed system is about 0.05 nm in a demodulation range of 4.2 nm.

Key words fiber optics; sensors; linear-cavity fiber Raman laser; step motor; non-zero dispersion shifted fiber

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)自产生之日起,就引起了传感领域的普遍关注^[1~3]。其应用要求也趋向于

多样化,高稳定性、高信噪比、超长距离等是其中的一些典型要求。当前满足以上要求的光纤布拉格光栅传感系统可采用可调窄带光源技术,常见的有基于掺稀土元素光纤激光器^[4]的光纤布拉格光栅传感

收稿日期:2005-08-08;收到修改稿日期:2006-02-28

基金项目:国家自然科学基金(60372100)和高校博士科研基金(20030013004)资助项目。

作者简介:张治国(1979—),男,新疆塔城人,北京邮电大学光通信中心博士研究生,主要从事光纤传感、光纤放大器等方面的研究。E-mail:z_z_g1979@163.com

导师简介:叶培大(1915—),男,上海南汇人,北京邮电大学光通信中心教授,中国科学院资深院士,博士生导师,近年主要从事光网络方面的研究。E-mail:pdye@bupt.edu.cn

系统和基于拉曼光纤激光器的光纤布拉格光栅传感系统^[5]。但掺稀土元素光纤激光器频率不稳定^[6],进而在基于这种激光器的分布式光纤布拉格光栅传感系统中,易产生传感信号间的干扰。与之相比,基于拉曼光纤激光器的光纤布拉格光栅传感系统具有系统稳定、传感距离长、信噪比高的优点,是一种很有前景的光纤布拉格光栅传感方案。本文提出了一种准静态分布式光纤布拉格光栅传感系统,该探测装置采用了线型腔拉曼光纤激光器技术和步进电机驱动一维调节器技术,具有诸多实用优点。

2 系统结构与解调原理

2.1 系统结构

实验系统结构如图 1 所示。系统采用光纤布拉格光栅对(传感光栅和匹配光栅)做拉曼光纤激光器的谐振腔,使用了由步进电机控制的一维调节器调谐匹配光栅,并构成解调系统的一部分。系统由匹配光纤布拉格光栅周期调节模块、光电变换模块、数据分析处理模块、线型腔拉曼光纤激光器模块等四部分组成。匹配光纤布拉格光栅的两端分别粘贴在一维调节器的两臂上,一维调节器的一臂固定,另一臂连接到步进电机的步进端上,步进电机经可编程逻辑控制器(PLC)由计算机(PC)控制其步进状态;计算机、步进电机、一维调节器共同构成了匹配光纤布拉格光栅周期调节模块。线型腔拉曼光纤激光器由拉曼增益抽运模块,30 km非归零色散位移光纤(NZDSF),波分复用器(WDM),匹配光纤布拉格光栅及传感光纤布拉格光栅对构成;其中抽运光经一复用器耦合进入光纤激光器。由匹配光纤布拉格光栅端输出的激光信号经波分复用器后由探测器(O/E转换电路)进行光电转换,为了便于直接观测输出激光信号,一光谱仪(OSA)与光探测器(PD)并列放

置,可用于替换光探测器进行直接观测及记录波形,转换后的电信号进入数据处理模块,数据处理模块根据输入的信号通过可编程逻辑控制器控制步进电机的步进状态及进行数据显示处理。较之传统的光谱仪直接检测法,系统信号解调方案不仅更系统化和实用化,而且大大降低了成本。

2.2 解调原理

根据受激拉曼散射理论^[7,8]知,受激拉曼散射光强

$$I(\nu, z) = I(\nu, 0)\exp(g_R z), \quad (1)$$

式中 g_R 称为受激拉曼散射增益因子,计算式为

$$g_R = N_a \sigma I_0 \frac{\lambda^2}{h\nu \Delta\nu}, \quad (2)$$

式中 ν 为受激拉曼散射光频率, N_a 为散射过程初始能级上的分子密度, σ 为分子微分散射截面, I_0 为总抽运光强, $\Delta\nu$ 为受激拉曼散射谱线宽度。由(2)式可知,受激拉曼散射增益因子 g_R 与 N_a, σ, I_0 成正比,而与 $\Delta\nu$ 成反比。由激光器阈值条件^[9]

$$R_t(\lambda)R_s(\lambda)\exp[(g_R - a)2L] \geq 1, \quad (3)$$

式中 $R_t(\lambda)$ 和 $R_s(\lambda)$ 为匹配光纤布拉格光栅和传感光纤布拉格光栅(本系统中,二者分别用作激光器谐振腔前腔镜和后腔镜,且传感光纤布拉格光栅中心波长 λ_s 准静态变化)的反射谱函数, a 为平均损耗系数, L 为腔长。

由以上理论分析可知,在本文基于光纤拉曼激光器的准静态光纤布拉格光栅传感解调系统中,当受激拉曼散射增益因子 g_R 充分大,且通过调节匹配光纤布拉格光栅使其布拉格周期等于传感光纤布拉格光栅的布拉格周期时,可使(3)式成立,此时光探测器可探测到激光输出。基于以上分析结果,通过选取适当的抽运光功率值,即选取适当的 g_R 值,调节匹配光纤布拉格光栅的布拉格周期,当光探测器探测到激光输出时,利用步进电机步进数与匹配光纤布拉格光栅布拉格周期改变量之间一一对应的关系,即可测定出相应的传感光纤布拉格光栅布拉格周期 λ_s ,进而完成光纤布拉格光栅传感信号的解调。

3 实验装置与结果

3.1 实验装置

基于线型腔拉曼光纤激光器的长距离光纤布拉格光栅传感实验装置如图 1 所示^[10,11]。匹配光纤布拉格光栅的布拉格周期调节模块由与步进电机相

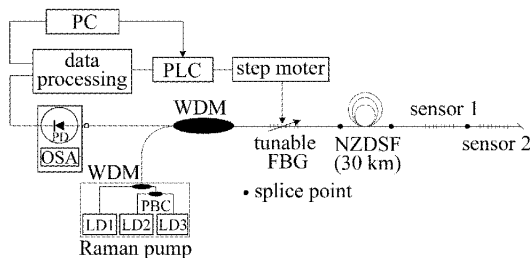


图 1 长距离分布式光纤布拉格光栅传感系统结构框图

(LD1 波长为 1427 nm, LD2, LD3 波长为 1457 nm)

Fig. 1 Schematic diagram of the long-distance distributed FBG sensor

(LD1: 1427 nm laser diode; LD2, LD3: 1457 nm laser diode)

连的一维调节器、步进电机、步进电机的控制系统可编程逻辑控制器及安装在计算机中的控制软件组成。实验系统中大扭矩步进电机的单脉冲旋转度为 $1.8^\circ/40$ ，一维调节器的调节柄旋转一周调节器的直线调节距离为 0.5 mm ，步进电机每步进一步，其产生的直线调节距离为 $0.5\text{ nm}/[360^\circ/(1.8^\circ/40)] = 62.5\text{ nm}$ ；布拉格周期可调节匹配光纤布拉格光栅被制作在一根光纤上，光纤的一端固定在系统基座上，另一端连接在一维调节器的调节端上，光纤两固定端的距离约为 0.25 m ，匹配光纤布拉格光栅位于光纤两固定端的中间位置。实验测得步进电机步进 50 步，匹配光纤布拉格光栅的布拉格周期改变量 $\Delta\lambda \approx 0.01\text{ nm}$ ；实验测量并记录了步进电机的步进数与 $\Delta\lambda$ ，以保证在系统测量过程中 $\Delta\lambda$ 改变量的准确性。在重复测量的过程中，虽然经历多次拉伸后步进电机所控制的光纤布拉格光栅谱线变化前后会有少许不同，但由于这种不同所造成的影响要远远小于系统的精度要求，所以可将其忽略。为了确定在拉伸匹配光纤布拉格光栅的过程中是否会导致其谱线变化以致影响系统性能，另行实验观测了光纤布拉格光栅拉伸前后的反射光谱的变化，由图 2 可知，拉伸前后光纤布拉格光栅反射谱的改变非常小，可近似忽略。同理，由传感所致的传感光纤布拉格

光栅的反射谱的变化也可近似忽略。

光电变换模块由最小探测功率小于 -40 dBm 的 PIN 光电二极管及相应支持电路构成，模块可探测到微瓦量级以下的光功率。数据分析处理模块由一数据库和相关数据处理软件构成，数据库内容为步进电机步进数和匹配光纤布拉格光栅布拉格周期改变量之间的关系。拉曼光纤激光器的增益介质是长为 30 km 的非归零色散位移光纤，插入损耗为 6 dB ；抽运源为三个中心波长分别为 1427 nm ， 1457 nm ， 1457 nm 的半导体激光器，最大发光功率均为 360 mW ，两个波长为 1457 nm 的输出光经一偏振光束耦合器(PBC)耦合后再经一波分复用器与波长为 1427 nm 的输出光共同耦合进拉曼光纤激光腔内。图 3(a) 为上述抽运源的拉曼增益测量方案，BBS 为低功率宽带光源；图 3(b) 为三抽运源功率分别为 200 mW ， 150 mW ， 150 mW 时测得的拉曼增益谱，可知在 $1525\sim 1580\text{ nm}$ 范围内，宽带小信号增益为 16 dB 左右。常温自由伸展状态下匹配光纤布拉格光栅和传感光纤布拉格光栅对的反射谱如图 4 所示。其中心反射波长分别为 1544.08 nm ， 1545.16 nm ， 1547.44 nm ，半峰全宽(FWHM)分别约为 0.20 nm ， 0.45 nm ， 0.46 nm ，反射率分别为 75% ， 95% ， 95% 。

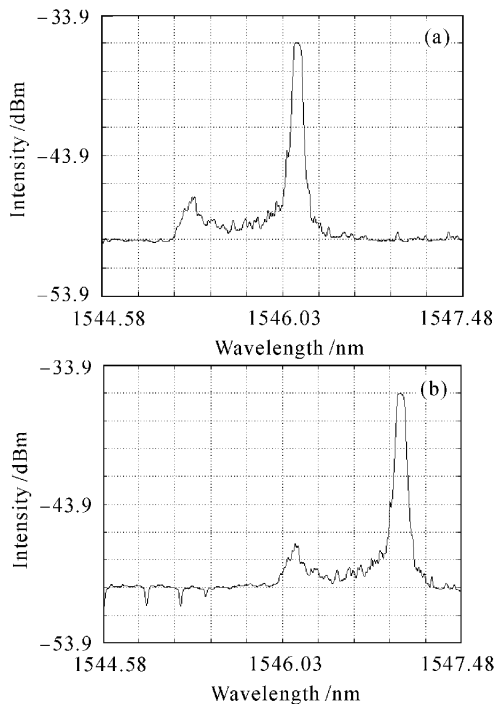


图 2 拉伸前(a)和拉伸后(b)光纤布拉格光栅的反射谱
Fig. 2 Reflection spectra of the FBG before been drawn (a) and after been drawn (b)

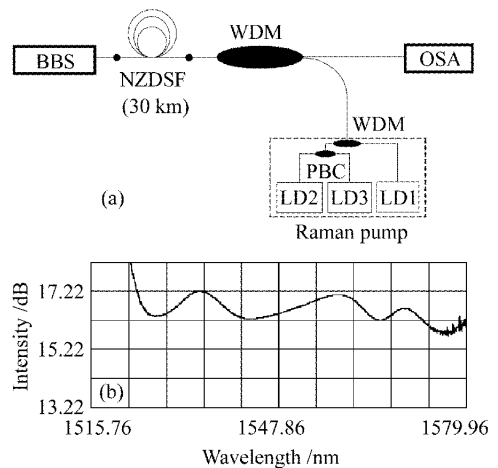


图 3 拉曼增益测量原理框图(a)和 $1525\sim 1580\text{ nm}$ 范围内的拉曼开关增益曲线(b)
Fig. 3 Schematic diagram of the Raman gain measurement (a) and Raman gain of on-off in the range of $1525\sim 1580\text{ nm}$ (b)

3.2 实验结果

基于以上实验装置，对系统进行了性能测试(为了降低温度对系统解调精度带来的影响，测试过程

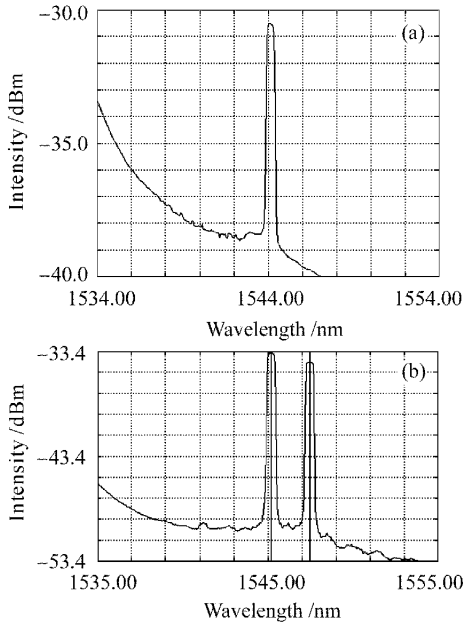


图4 自由伸展状态下光纤布拉格光栅的反射谱
 (a) 匹配光纤布拉格光栅反射谱;
 (b) 传感光纤布拉格光栅对反射谱
 Fig. 4 Reflection spectra of the tunable FBG (a) and the sensing FBG (b)

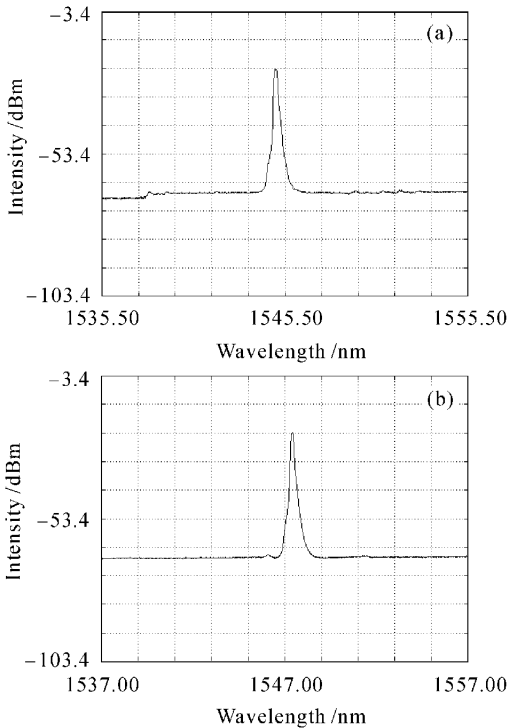


图5 实验结果

匹配光纤布拉格光栅的布拉格周期等于光纤布拉格光栅传感器1(a)和匹配光纤布拉格光栅的布拉格周期等于光纤布拉格光栅传感器2(b)的布拉格周期时测得的拉曼激光光谱

Fig. 5 Measure results

the laser spectra when the Bragg period of the tunable FBG equal to the sensor1 (a) and when the Bragg period of the tunable FBG equal to the sensor2 (b)

中环境温度基本保持在室温状况)。在测试系统的三个抽运源功率分别为 200 mW, 150 mW, 150 mW, 传感光纤布拉格光栅处于常温自由伸展状态时,图 5 为调节匹配光纤布拉格光栅布拉格周期过程中,匹配光纤布拉格光栅布拉格周期分别等于两个传感光纤布拉格光栅布拉格周期时测得的拉曼激光出射谱,此时匹配光纤布拉格光栅的布拉格周期分别等于两个传感光纤布拉格光栅的布拉格周期;由图 4(b)和图 5 测量值可知,激光波长与传感光纤布拉格光栅的布拉格周期大小具有很好的匹配性。图 6 为当 sensor1 的布拉格周期在 1545.16~1549.36 nm 内做准静态拉伸变化时,测得的光栅布拉格周期同输出的激光光功率变化关系曲线;对比图 3(b)和图 6 可知,在 1545.16~1549.36 nm 范围内,输出激光功率大小及拉曼增益大小均随波长增加而增大,即某一波长的输出激光功率的大小是同比波长处拉曼增益的大小成正比的。图 7 是 sensor1 的布拉格周期稳定在 1547.16 nm, sensor2 的布拉格周期稳定在 1547.44 nm 时用本系统连续 10 次所测得的两传感光纤布拉格光栅的周期,作此

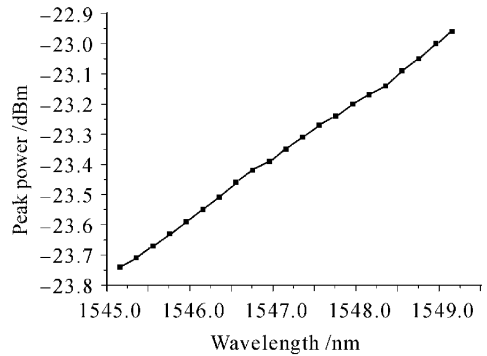


图6 传感光栅布拉格周期同输出激光功率的变化关系

Fig. 6 Variation of peak power as a function of the FBG Bragg period

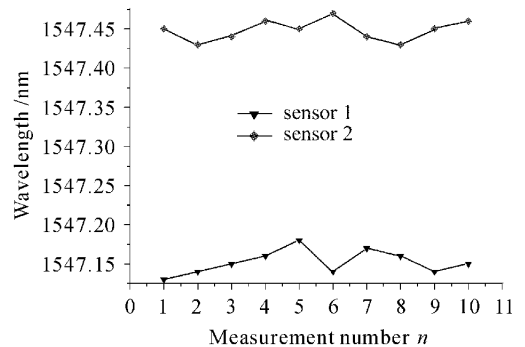


图7 系统稳定性测量结果

Fig. 7 Result of the stability measurement of the system

测量时,传感光纤布拉格光栅的周期即其环境温度非常稳定;由图 7 可知,多次测量同一光纤布拉格光栅周期,其测量值在 0.05 nm 的误差范围内。本系统具有较好的重复测量稳定性。

4 结 论

提出了一种基于线型腔拉曼光纤激光器的长距离分布式光纤光栅传感解调系统,并进行了理论分析和实验验证。在理论分析的基础上,对系统的性能参数进行了测试。传感光栅为两个常温自然伸展状态下布拉格周期分别是 1545.16 nm, 1547.44 nm 的石英光栅,实验测得两个光纤布拉格光栅传感器中心反射波长在 1545.16~1549.36 nm, 1547.44~1551.40 nm 的范围内准静态变化时,系统有稳定的拉曼激光输出,且波长探测精度约为 0.05nm。本传感系统具有高信噪比、高稳定性、超长传感距离和很好的扩展性等特点。它对于需要高稳定性和超长传感距离的传感探测领域具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- 1 L. A. Ferreira, J. L. Santos, F. Farahi. Pseudoheterodyne demodulation technique for fiber Bragg grating sensors using two matched gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(4):487~489
- 2 Youlong Yu, Luenfu Lui, Hwayaw Tam *et al.*. Fiber-laser-based wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating sensor system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(7):702~704
- 3 Yu Youlong, Zhao Hongxia, Liu Shengchun *et al.*. Time-domain demodulation technique for active fiber Bragg grating sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):983~987
余有龙,赵洪霞,刘盛春等. 光纤光栅传感系统有源时域解调技术[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8):983~987
- 4 Pan Yuzhai, Zhang Jun, Hu Guijun *et al.*. High-power ytterbium-doped fiber laser based on fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9):1237~1239
潘玉寨,张军,胡贵军等. 利用光纤光栅的高功率掺镱光纤激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9):1237~1239
- 5 Peng Chun Peng, Hong Yih Tseng, Sien Chi. Long-distance FBG sensor system using a linear-cavity fiber Raman laser scheme [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2):575~577
- 6 Chi Ronghua, Lü Kecheng, Chen Shengping *et al.*. Research on lasing wavelength of fiber grating laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11):1315~1319
迟荣华,吕可诚,陈胜平等. 光纤光栅激光器激光波长的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11):1315~1319
- 7 N. R. Newbury. Pump-wavelength dependence of Raman gain in single-mode optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(12):3364~3373
- 8 Xin Xiangjun, Yu Chongxiu, Zhang Ru *et al.*. Influence of channel power and pumping configuration on the gain profile of distributed Raman fiber amplifier [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20**(2):237~239
- 9 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Cheng Tirong *et al.*. Laser Principle [M]. Fourth edition. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 166~185
周炳琨,高以智,陈倜嵘等. 激光原理[M]. 第四版. 北京:国防工业出版社,2000. 166~185
- 10 Ling Zhao, Chunlin Zhang, Lina Li *et al.*. Optimization of linear cavity design of Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(3):148~150
- 11 Ming Gang Xu, Harald Geiger, John P. Dakin. Modeling and performance analysis of a fiber Bragg grating interrogation system using an acousto-optic tunable filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(3):391~396