

基于自外差探测的多光纤光栅远程传感系统

蔡江江¹ 许国良¹ 胡君辉^{1,2} 王如刚¹

(¹南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210008
²广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004)

摘要 提出并实验证明了一种基于自外差探测和波长扫描技术的光纤布拉格光栅远距离传感系统。该系统将远程光纤光栅阵列的反射信号光与本地参考光进行差频探测,并通过声光调制器对探测光的频移及脉冲进行调制,有效地提高了系统的探测灵敏度和传感距离。在没有放大的情况下,在 171 km 的探测距离处,光纤光栅传感器的反射布拉格波长信号的信噪比达到 33 dB。该系统可以准确地绘制出远端光纤光栅阵列的反射谱,实验结果显示两个光纤光栅的布拉格波长与温度均成良好的线性关系,且传感灵敏度为 11 pm/°C。

关键词 光通信;光纤布拉格光栅;远程传感;自外差探测;温度检测;波长扫描

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1214002

Remote Fiber Bragg Grating Sensors System Based on Self-Heterodyne Detection

Cai Jiangjiang¹ Xu Guoliang¹ Hu Junhui^{1,2} Wang Rugang¹

(¹Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210008, China)
(²College of Physics Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract A remote fiber Bragg grating (FBG) sensors system based on the self-heterodyne detection and wavelength-sweeping technique is proposed and experimentally demonstrated. In this system, the heterodyne signal produced by the reflected sensing signal and the local reference beam is detected by a balanced photodetector. With frequency-shift and pulse-modulation of the acousto-optic modulator, the detection sensitivity and sensing distance are improved effectively. The system is able to detect the two multiplexed FBGs placed 171 km away, offering a signal-to-noise ratio of 33 dB without amplification. In addition, this system can scan the reflection spectra of FBGs accurately. Applying this system to remote temperature detection, the results show the typical liner behavior of both FBGs, shifting their reflected Bragg wavelengths in 11 pm/°C.

Key words optical communications; fiber Bragg grating; remote sensing; self-heterodyne detection; temperature measurement; wavelength-sweeping

OCIS codes 060.3735; 280.4788; 060.2840

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰、结构简单和分辨率高等优点^[1],近年来,引起了研究人员的广泛关注^[2~4]。在许多工程应用方面,都需要超长距离(传输距离超过 100 km)的光纤光栅传感系统,如输油管道健康监测、地质监

测和飓风预警等。但是,由于瑞利散射和光纤损耗等因素的影响,传统的光纤光栅传感系统最大传感距离只有 25 km^[5],限制了系统在实际中的应用。因此,提高 FBG 传感系统的传感距离和测量精度显得非常重要。目前,提高 FBG 传感系统测量距离的方法主要有两种:增加入射光功率和提高探测灵敏

收稿日期: 2012-07-05; **收到修改稿日期**: 2012-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(60602001)和中央高校基本科研项目(14340039、14340003)资助课题。

作者简介: 蔡江江(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感器方面的研究。E-mail: cjj63@163.com

导师简介: 许国良(1973—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光通信系统、器件及其关键技术,光网络健康监测和性能监控,通信网络规划和设计等方面的研究。E-mail: xugl@nju.edu.cn(通信联系人)

度。在增加入射光功率方面,已有很多研究报道,比如 2004 年, Lee 等^[6]提出了一种基于掺铒光纤(EDF)和拉曼放大器的远距离 FBG 传感系统,将传感距离增加到 50 km;2005 年, Peng 等^[7]提出了一种基于光纤环形激光器并结合掺铒波导放大器和半导体光放大器的 FBG 传感系统,获得了 25 km 的探测距离;2007 年和 2009 年, Rao 等^[8,9]分别提出了一种 100 km 的基于可调谐激光环结构的 FBG 传感系统和一种 300 km 的基于混合掺铒光纤放大和拉曼放大的远程传感系统;2010 年, Hu 等^[10]也利用一台 1 W 的拉曼激光器和两段掺铒光纤,实现了测量距离为 100 km 的 FBG 传感系统。在这些报道中,都是采用增加放大器抽运功率的方法来提高探测距离,而在提高探测灵敏度方面,并没有进行相关研究,都是采用直接探测的方法。但是随着抽运功率的增大,一方面瑞利噪声等各种噪声会随之增加,降低了系统的信噪比,影响测量的精确性;另一方面当超过受激布里渊阈值时,会导致受激效应,影响传输距离^[11]。因此,提高探测灵敏度成为研究 FBG 远程传感系统的新焦点。

为了提高系统的探测灵敏度,外差探测是最常用的一种方法^[12]。与直接探测相比,外差检测方法不仅可以将太赫兹量级的高频信号降至易于探测和处理的百兆赫兹中频信号,且通过提高本地参考光的功率还可以大大提高探测灵敏度,非常适用于微弱信号的检测。为此,本文在分析外差检测基本原理的基础上,提出一种基于自外差探测技术的超长距离、高精度的光纤布拉格光栅传感系统。在该系统中,采用了自外差检测的方法,有效降低了零频噪声,提高了探测灵敏度。采用两个 FBGs 同时实现温度测量的实验表明,该系统可以实现多个传感光栅的同时测量。

2 工作原理

图 1 为外差探测原理图,其中 OLO 是本地振荡器,PD 为光电探测器。假设被测信号场和本地振荡场分别为 $E_s \cos \omega_s t$ 、 $E_L \cos \omega_L t$,则混频之后的总光场为

$$E_D = E_s \cos \omega_s t + E_L \cos \omega_L t, \quad (1)$$

光电探测器测得的光信号强度为^[13]

$$P_D = kE_D^2 = kE_s^2 + kE_L^2 + 2kE_s E_L \cos(\omega_s - \omega_L)t = kE_L^2 \left[\frac{E_s^2}{E_L^2} + 1 + \frac{2E_s}{E_L} \cos(\omega_s - \omega_L)t \right], \quad (2)$$

式中 k 为比例常数, kE_s^2 为信号光功率, kE_L^2 为本地参考光功率。

由于光电探测器产生的光电流与接收到的光信号强度成正比,且本地振荡器产生的光比被测试的信号光强得多($E_L \gg E_s$),所以光电探测器探测到的光电流可表示为

$$i_c(t) = \alpha E_L^2 \left[1 + \frac{2E_s}{E_L} \cos(\omega_L - \omega_s)t \right] = \alpha E_L^2 \left[1 + 2 \sqrt{\frac{P_s}{P_L}} \cos(\omega_L - \omega_s)t \right], \quad (3)$$

式中 α 为比例常数, P_s 和 P_L 分别为信号光和本地参考光的功率。光电探测器的噪声主要来源于散粒噪声和热噪声,如果滤除外差探测的直流量,则输出端的信噪比可以表示为^[14]

$$R_{SN} = \frac{2G^2 (P_s P_L) \left(\frac{e\eta}{h\nu} \right)^2}{G^2 2e \left(i_d + P_L \frac{e\eta}{h\nu} \right) \Delta\nu + \frac{4kT_c \Delta\nu}{R}}, \quad (4)$$

式中 G 为探测器的电流增益, η 、 $h\nu$ 、 i_d 和 $\Delta\nu$ 分别为量子效率、光子能量、平均暗电流和探测器后滤波器的带宽, $\frac{4kT_c \Delta\nu}{R}$ 表示在输出负载上产生的热噪声以及探测器的有效输入噪声。当本地振荡功率 P_L 的值足够大时,(4)式可近似为

$$R_{SN} \approx \frac{P_s}{(h\nu \Delta\nu)/\eta}, \quad (5)$$

这意味着外差探测可以达到光探测的量子极限。在实际应用中,为了确保本地振荡器产生的本地参考光和信号光的稳定性,通常将一个激光器产生的光分成两路,一路作为探测光,另一路作为本地参考光,称为自外差探测。

如果激光器的输出波长可调,且线宽远远小于 FBG 的反射谱宽,那么通过波长扫描的方法就可以绘制出远程光纤光栅或光纤光栅阵列的反射谱,对反射谱进行分析就可以得出外界温度、应力等传感量的变化。

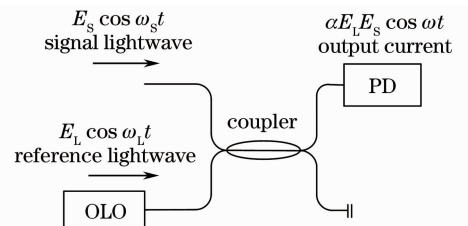


图 1 外差探测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of heterodyne detection

3 传感系统实验结构

基于自外差探测的远程光纤光栅传感系统如图 2 所示。波长可调激光器 (TLS) 的调节范围为 1527.60~1565.50 nm, 线宽为 100 kHz。光源发出的光经过 90/10 耦合器 C1 分成两路: 一路光 (10%) 通过扰偏器 (PS) 后作为本地参考光, 扰偏器通过混合各种偏振态来达到稳定测量的目的; 另一路光 (90%) 通过声光调制器 (AOM) 调制成探测脉冲光, 并产生 40 MHz 的频移, 声光调制器由脉冲信号发生器 (EPSG) 驱动控制, 产生所需宽度的探测脉冲光。脉冲光经过环形器 (OC) 入射到 170 km 的普通单模光纤, 然后进入末端的两个光纤光栅传感器, 其中心波长分别为 1550 nm 和 1554 nm, 反射率都大于 90%。光纤光栅传感器反射回来的信号光与本地参考光在 50/50 耦合器 C2 中进行混频, 通过平衡探测器 (PDB) 转换为电信号, 并利用频谱分析仪 (ESA) 测量所得的电信号。

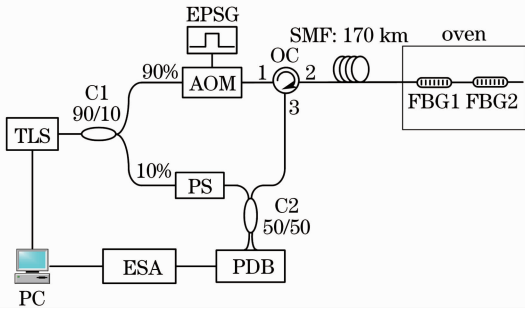
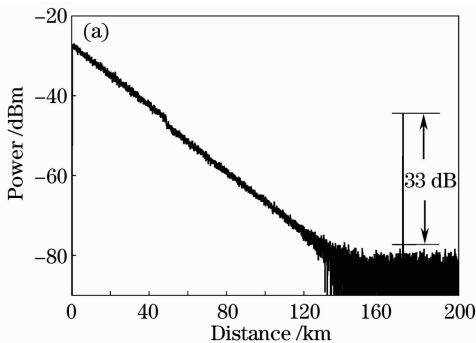


图 2 基于自外差检测的光纤光栅远程传感系统

Fig. 2 Scheme of remote FBG sensors system based on self-heterodyne detection

在实验中, AOM 将连续光调制成探测脉冲光, 根据光时域反射 (OTDR) 技术即通过脉冲光往返时间就可以计算出传输光纤的距离, 实现对远端光纤光栅传感器的定位。另外, AOM 固有的移频效应



可以将探测脉冲光进行 40 M 移频, 使得探测器最后探测到的差频信号中心频率为 40 MHz, 有效地避免了零频噪声的影响。

把频谱仪的中心频率调到 40 MHz, 在零跨度模式下可以得到差频信号的时域轨迹。改变激光器的输出波长, 就可以采集到各个波长下对应的差频信号的峰值功率, 从而绘制出光纤光栅传感器的反射谱。该传感系统中, 激光器波长调节和频谱仪的数据采集都可以用计算机控制, 大大提高了系统的运行效率。

4 实验结果及分析

为了测试该远程传感系统的性能, 将两个光纤光栅传感器置于恒温箱内, 保持恒温箱的温度为 40 °C, 设置可调谐激光器的输出功率为 16 dBm, 然后通过计算机调节激光器的输出波长, 从频谱仪上就可以采集到各个波长下光纤光栅传感器反射信号光的功率。当输出波长为 1550.015 nm 和 1554.335 nm 时, 差频信号的时域轨迹如图 3(a)、(b) 所示。图 3 中的 1 为两段光纤的连接点, 由于连接点的损耗, 出现了反射功率的下降部分。在光纤末端的峰, 为 FBG 反射回来的信号, 当激光输出波长分别为 1550.015 nm 和 1554.335 nm 时, 从图 3 可以看出其信噪比都约为 33 dB, 这样的信噪比可以得出精确的功率谱。通过寻找每个波长下测得的峰值功率, 就可以绘制出该温度下远端光纤光栅传感器传感器的反射谱, 当恒温箱温度为 40 °C 时, 得出的两个光纤光栅传感器的反射谱如图 4 所示。从图 4 可以看出, 两个 FBGs 的中心波长分别为 1550.1 nm 和 1554.4 nm, 这和光栅在该温度下的实际中心波长基本相符; 两个反射谱的峰值功率分别为 -44.2 dBm 和 -44.8 dBm, 功率的差异主要是两个 FBGs 的反射

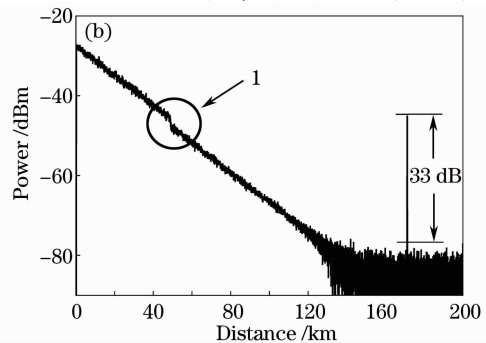


图 3 40 °C 差频电信号的时域轨迹图。中心波长分别为 (a) 1550.015 nm 和 (b) 1554.335 nm

Fig. 3 Time-domain traces of the heterodyne signals at temperature of 40 °C. Center wavelengths are (a) 1550.015 nm and (b) 1554.335 nm respectively

率不同造成的。

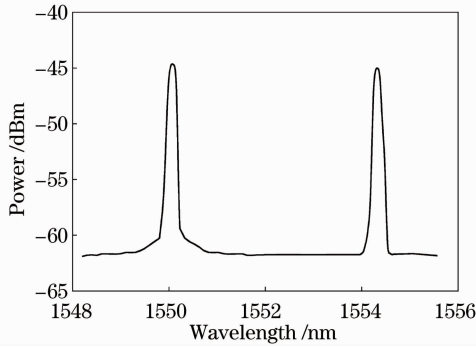


图 4 40 °C 远端光纤光栅传感器反射谱

Fig. 4 Reflection spectrum of FBG sensor at temperature of 40 °C

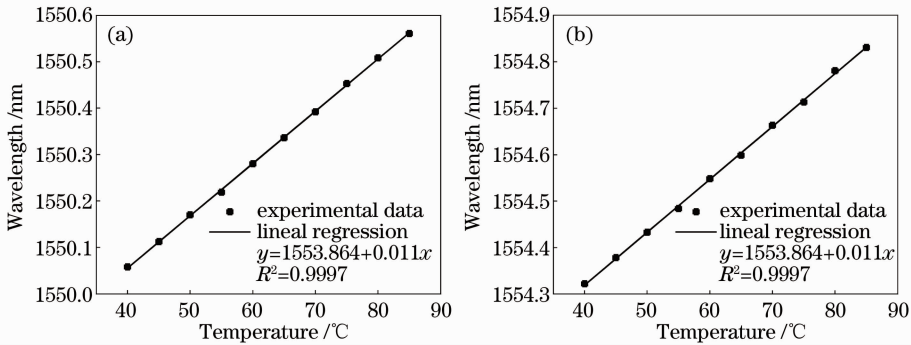


图 5 光纤布拉格光栅波长与温度变化关系。(a) 光纤布拉格光栅 1; (b) 光纤布拉格光栅 2

Fig. 5 Relationship between wavelength and temperature of FBGs. (a) FBG 1; (b) FBG 2

5 结 论

提出了一种基于自外差探测和波长扫描的远程多光纤光栅传感系统。利用两个光纤光栅传感器组成的传感系统,在不使用光放大器的条件下,可以精确地检测到 171 km 之外的光纤光栅布拉格传感信号,且信噪比达到 33 dB。实验结果显示了两个光纤光栅传感器的布拉格波长漂移与温度成良好的线性关系,布拉格波长随温度变化的灵敏度约为 11 pm/°C。另外,该系统还可以运用于远程应力的测量,在不超过激光器波长变化范围的情况下可以增加远端 FBG 的数量。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15** (8): 1442~1463
- 2 Ying Chaofu, Peng Baojin, Ren Zhijun *et al.*. Demodulation method of distributed fiber Bragg grating sensor using blazed fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2891~2895
- 3 应朝福, 彭保进, 任志君等. 基于闪耀光纤光栅透射特性的分布

式布拉格光栅传感器解调方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2891~2895

3 Fan Fan, Zhao Jianlin, Wen Xixing *et al.*. Sensitivity analysis on strain sensor based on Fabry-Perot interferometer with intensity interrogation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1525~1531

樊帆, 赵建林, 文喜星等. 强度解调型光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的应变传感灵敏度分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1525~1531

4 Zou Hongbo, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Dynamic demodulation of fiber Bragg grating vibration sensor based on cascaded long-period fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805005

邹红波, 梁大开, 曾捷等. 基于级联长周期光纤光栅的光纤布拉格光栅振动传感器的动态解调[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805005

5 J. Lee, J. H. Kim, Y. G. Han *et al.*. Investigation of Raman fiber laser temperature probe based on fiber Bragg gratings for long distance remote sensing applications [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8): 1747~1752

6 J. H. Lee, Y. Chang, Y. G. Han *et al.*. Raman amplifier-based long-distance remote, strain and temperature sensing system using an erbium-doped fiber and a fiber Bragg grating[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3515~3520

7 P. C. Peng, K. M. Feng, W. R. Peng *et al.*. Long-distance fiber grating sensor system using a fiber ring laser with EDWA and SOA[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **252**(1-3): 127~131

8 Y. J. Rao, Z. L. Ran, X. D. Luo. An ultra-long-distance FBG

调节恒温箱的温度,将箱内温度由 40 °C 升至 85 °C,每隔 5 °C 测量一次,在每个温度下通过计算机调节激光源的输出光波长。波长总范围为 1549.805~1554.965 nm,每隔 10 pm 调节一次。利用上述远程光纤光栅传感器传感系统测出各个温度下两个光纤光栅传感器所对应的布拉格波长,如图 5 所示,其中图 5(a)和(b)分别是 FBG1 和 FBG2 在各个温度下测得的布拉格波长,并对测量结果进行线性拟合。从图 5 可以看出,随着温度的增加,布拉格波长呈线性的增加,拟合度均大于 99%,其波长与温度的斜率均为 11 pm/°C,即温度灵敏度为 11 pm/°C,这与光纤光栅传感器出厂附带的测试说明所给的 10 pm/°C 的温度灵敏度十分吻合。因此,本系统可以应用于超过 170 km 的超远距离温度测量。

- sensor system based on a tunable fiber ring laser configuration [C]. Anaheim: Optical Fiber Communication, Conference and Exposition National Fiber Optic Engineers Conference, 2007. 1~3
- 9 Y. J. Rao, S. Feng, Q. Jiang *et al.*. Ultra-long distance (300 km) fiber Bragg grating sensor system using hybrid EDF and Raman amplification [C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 75031Q
- 10 J. H. Hu, Z. H. Chen, X. F. Yang *et al.*. 100-km long distance fiber Bragg grating sensor system based on erbium-doped fiber and Raman amplification [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(19): 1422~1424
- 11 R. G. Wang, X. P. Zhang, J. H. Hu *et al.*. Photonic generation of tunable microwave signal using Brillouin fiber laser [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(8): 1028~1032
- 12 F. Wang, C. L. Li, X. D. Zhao *et al.*. Using a Mach-Zehnder-interference-based passive configuration to eliminate the polarization noise in Brillouin optical time domain reflectometry [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(2): 176~180
- 13 Wang Feng. Research of the Spatial Resolution for the Fully Distributed Optical Fiber Sensor Based on Brillouin Scattering [D]. Nanjing: Nanjing University, 2009. 20~22
- 王峰. 基于布里渊散射的全分布式光纤传感系统空间分辨率的研究[D]. 南京: 南京大学, 2009. 20~22
- 14 A. Yariv, P. Yeh. *Optical Electronics in Modern Communications*[M]. New York & Oxford: Oxford University Press, 2007. 507~509

栏目编辑:何卓铭