

文章编号:1004-4213(2010)11-2004-4

基于时分复用和窄波长扫描激光的长距离光纤布喇格光栅传感系统*

刘川¹, 饶云江^{1,2}, 冉曾令¹, 封莎¹

(1 电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 610054)

(2 重庆大学 光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:提出了一种通过提高长距离光纤布喇格光栅传感系统容量,从而实现多传感点参量测量的新方法.采用时分复用、窄波长范围扫描激光方式,将多个中心波长相近的低反射率光纤布喇格光栅放置于系统的不同位置,构成准分布式光纤传感系统,实现了多个传感点参量的同时测量.同时提出了采用掺铒光纤和喇曼混合放大方法来延长传感距离.在系统的中间加入一个喇曼泵浦进行喇曼放大以此补偿光纤布喇格光栅反射的信号,系统末端的掺铒光纤利用前面喇曼泵浦剩余的泵浦功率产生自发辐射光并放大传感信号,使得整个系统的传感距离延长.实验证实:将三只中心波长均在 1 580 nm 附近,反射率均小于 4% 的光纤布喇格光栅,分别放置在系统的不同位置,在 200 km 处获得了 15 dB 的信噪比,反射信号明显;并且在 200 km 处的静态应变和温度实验中,线性度均达到了 0.999 以上.

关键词:光纤传感器;低反射率光纤布喇格光栅;时分复用;窄波长扫描激光;喇曼放大

中图分类号:TP212.14

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103911.2004

0 引言

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)作为一种新型的全光纤传感器具有良好的稳定性、可靠性、对电磁波不敏感性、重量轻、体积小等优点,可大规模化生产,适用于高温、腐蚀性或危险性的环境^[1-3].目前已经广泛地用于民用建筑、大坝、桥梁、电力系统、矿井等的安全检测以及智能结构的无损检测等^[4].但是目前由于激光器功率的限制,光纤传输中瑞利散射、光纤传输损耗和光纤连接处的插入损等导致传感信号强度和信噪比不断下降,从而限制了 FBG 传感距离.为了实现长距离的遥测,需要将传感信号放大以提高信号强度和信噪比.最近几年,已提出了几种方法来增加 FBG 传感系统的传输距离^[5-9].Takanori Saitoh 等人提出基于掺铒光纤放大器(Er-Doped Fiber Amplifier, EDFA)的 FBG 传感系统实现了 230 km 系统,但其信噪比仅有 4 dB,并且对系统光源要求很高^[10].饶云江等人提出基于可调激光器的 FBG 传感系统,利用 EDFA/FRA 混合放大的方法,使得整个系统的探测距离达到 300 km,信噪比仍有 4 dB.但是前面提出的方法

能复用的 FBG 数量有限,使得能测量的传感点很少,并且光源扫描范围比较宽,扫描时间比较长^[11-12].为了实现传感系统能同时实时监测多个待测点,本文提出了采用时分复用、窄波长范围扫描激光的方式,将多个中心波长相近的低反射率 FBG 放置于系统的不同位置,构成准分布式光纤传感系统,实现多个传感点的参量同时测量.同时本文还提出采用掺铒光纤和喇曼混合放大方法来延长传感距离.

1 实验系统和原理

实验系统装置如图 1.从激光器发出的光经过由任意波形发生器调制的电光调制器形成脉冲光经过环形器 1 进入光纤,由后向泵浦对信号光进行喇曼放大,泵浦剩余的能量经过 WDM₃ 进入掺铒光纤产生放大自发辐射光(Amplified Spontaneous Emission, ASE),再经过环形器 3 进入后面的光纤,从后面 FBG 反射的光经过环形器 2 和环形器 3 绕过掺铒光纤,直接进入 WDM₂ 前面的光纤,进行喇曼后向放大,以提高信号信噪比.同时,由于环形器的方向选择性,环形结构中掺铒光纤产生的放大自发辐射后向光不能返回探测器,从而消除了其对反射信号信噪比的影响.本实验使用了三只中心波长均在 1 580 nm 附近,反射率均小于 4% 的 FBG,

* 国家自然科学基金重点项目(60537040)资助

Tel:13679045753

Email:liuchuan686@163.com

收稿日期:2010-05-10

修回日期:2010-06-21

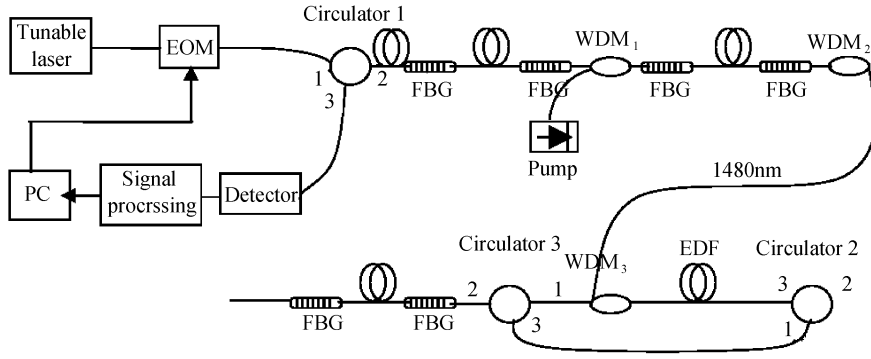


图 1 实验系统装置
Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

分别分布在系统的不同位置. 在环形器 2 和 WDM₃ 处加入 16 m 的掺铒光纤, 这段掺铒光纤吸收泵浦剩余的能量产生 L 波段的 ASE, 提供给后面的光纤布喇格光栅进行反射.

实验中采用的光源是美国安捷伦公司生产的波长可调谐的激光器 (Agilent_81642A), 波长扫描范围为 1 510~1 640 nm, 由于实验所采用的 FBG 中心波长均在 1 580 nm 附近, 所以设定激光器扫描范围为 1 579~1 581 nm, 扫描方式为 step, 设置扫描步长为 0.01 nm. 电光调制器的调制频率为 400 Hz, 调制信号脉冲占空比为 0.5%.

2 实验结果与讨论

实验结果如图 2. 在传感距离大约为 10、165 和 200 km 处放置 FBG, 光源扫描范围为 1 579~1 581 nm, 扫描方式为 step, 每 10 pm 测量一组数据, 并作曲线拟合. 从图中可以看出, 在 200 km 处的 FBG 反射信号非常明显.

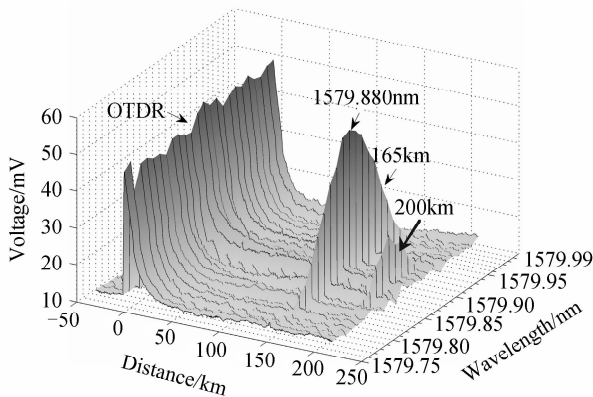


图 2 FBG 反射信号的实验测量图
Fig.2 Testing results of the long-distance FBG reflective signals

表 1 所示为加泵浦和未加泵浦时在不同距离处 FBG 反射信号的信噪比. 在未加泵浦时, 在 70 km 处系统的信噪比能达到 16 dB; 加入 0.53 W 泵浦时, 在 200 km 处信噪比仍然达到了 15 dB.

表 1 不同距离处 FBG 反射信号信噪比
Table 1 SNR of the FBG reflective signal with different distance

| Distance/km | 50 | 70 | 110 | 165 | 200 |
|------------------|----|----|-----|-----|-----|
| Without pump | 26 | 16 | 0 | 0 | 0 |
| With pump(0.53W) | — | 66 | 32 | 20 | 15 |

为了验证系统能够在 200 km 的远距离上进行传感测量, 对系统的最后一个 FBG 进行了静态应变和温度实验.

使用微动台对系统最后一个 FBG 进行静态应变实验, 使用多波长计来测量光纤布喇格光栅反射波长随应变的变化, 每 20 个微应变测量一次数据, 测量 20 组, 并作线性拟合. 实验结果如图 3, 它们线性相关系数 R 的平方值为 0.9996, 具有很好的线性关系. 同时可以计算出其温度灵敏度为 $1.1 \text{ pm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 与理论值 $1 \text{ pm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 较为一致.

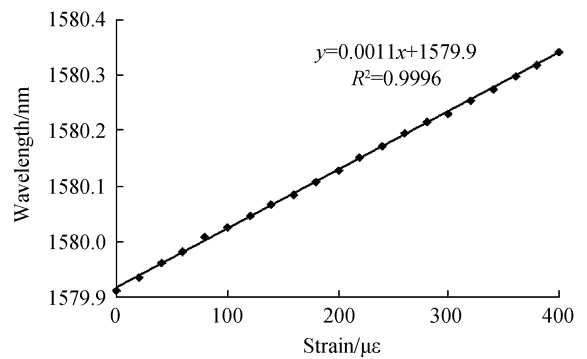


图 3 光纤布喇格光栅波长与应变的关系
Fig.3 Relationship between FBG wavelength and strain

将系统最后一个 FBG 放在恒温箱中, 仍使用多波长计来测量 FBG 反射波长随温度的变化, 设定温度的变化范围为 $5 \text{ }^\circ\text{C} \sim +125 \text{ }^\circ\text{C}$, 每隔 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 记录一次数据, 并作线性拟合. 实验结果如图 4, 它们线性相关系数 R 的平方值为 0.9997, 线性关系良好. 同时可以计算出其温度灵敏度为 $8.9 \text{ pm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 与理论值 $8.2 \sim 12 \text{ pm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 较为一致. 说明本系统完全可以应用于应变和温度等参量的多传感点的测量.

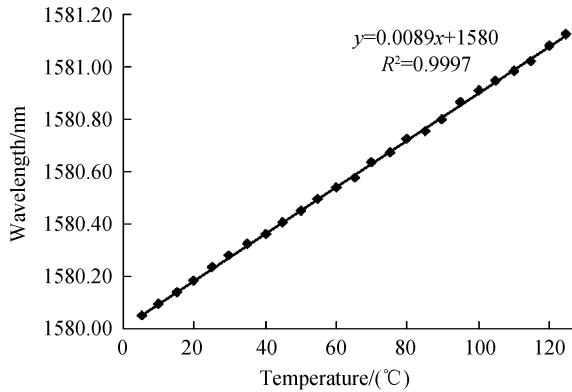


图4 光纤布喇格光栅波长与温度的关系

Fig. 4 Relationship between FBG wavelength and temperature

3 结论

本文提出采用时分复用、窄波长范围扫描激光以及喇曼放大的方式,将多个中心波长相近的低反射率光纤布喇格光栅放置于系统的不同位置,构成准分布式光纤传感系统,实现 200 km 长距离多传感点的测量.实验结果表明使用时分复用和窄波长范围扫描激光能有效提高 FBG 传感系统的容量.同时,使用喇曼和 EDF 混合放大能有效延长 FBG 的传感距离.这种经过光放大的低反射率光纤布喇格光栅传感系统具有良好的应用前景,可以实现长距离,多传感点的遥测.同时,优化本系统参量以及光放大方案可以通过进一步延长系统的传感距离并增加传感点来实现.

参考文献

[1] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, *et al.* Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1442-1460.

- [2] RAO Y J. In-fibre Bragg grating sensors[J]. *Meas Sci Technol*, 1997, **8**(4): 355-375.
- [3] RAO Y J. Recent progress in application of in-fiber Bragg grating sensors[J]. *Optics and Laser in Engineering*, 1999, **31**(4): 297-324.
- [4] PENG P C, HONG Y T, SIEN C. Long-distance FBG sensor system using a linear-cavity fiber Raman laser scheme[J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2004, **16**(2): 575-577.
- [5] PENG P C, FENG K M, PENG W R, *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.
- [6] LEE J H, HAN Y G, CHANG Y M, *et al.* Raman amplifier based long-distance remote FBG strain sensor with EDF broadband source recycling residual Raman pump[J]. *Electron Lett*, 2004, **40**(18): 1106-1107.
- [7] RAO Y J, RAN Z L, CHEN R R. A long-distance FBG sensor system with high optical SNR based on a tunable fiber ring laser configuration[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(18): 2684-2686.
- [8] ZHENG Li, ZHENG Cheng-dong, HE Jun-hua, *et al.* Bragg grating hydrophone based on dense wave division multiplexing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1348-1350. 郑黎,郑成栋,何俊华,等.基于密集波分复用技术的 Bragg 光栅水听器[J].光子学报,2004,**33**(11):1348-1350.
- [9] FU H Y. A novel fiber Bragg grating sensor configuration for long-distance quasi distributed measurement [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(9): 1598-1602.
- [10] HU J H, CHEN Z H. Long-distance fiber Bragg grating sensor system based on erbium-doped fiber and Raman amplification[C]. 2009 OSA, 2009: 1-6.
- [11] BOUTEILLER J C, BROMAGE J, THIELE H J, *et al.* An optimization process for Raman amplified long-span transmission[J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2004, **16**(1): 326-328.
- [12] IDAN M, MAXIM B. Raman amplifier model in single-mode optical fiber[J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2003, **15**(12): 1704-1706.

Long-distance Fiber Bragg Grating Sensor System Based on Time Division Multiplexing and Narrow Wavelength Swept Laser

LIU Chuan¹, RAO Yun-jiang^{1,2}, RAN Zeng-ling¹, FENG Sha¹

(1 Key Lab of Optical Fiber Sensing & Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

(2 Key Lab of Opto-Electronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A novel low-reflectivity Fiber Bragg Grating sensor system with a combination of time division multiplexing mode, a narrow wavelength swept laser is proposed and demonstrated for achieving multiple sensing points, long-distance, quasi-distributed measurement. Time division multiplexing mode and the low reflectivity Fiber Bragg Gratings which have the close center wavelength are used to monitor multiple points simultaneously. And, Er-doped fiber and Raman amplification method is proposed to extend the sensing distance. The middle of the system involves a Raman pump for amplifying FBG reflected signal, and the Erbium-doped fiber uses the remaining Raman pump power to generate amplification of spontaneous emission and amplify sensing signal. Experimental results show that an excellent optical SNR of 15 dB has been achieved for 200 km transmission distance. In the static strain and temperature experiments at the distance of 200 km, the linearities achieve more than 0.999.

Key words: Optical fiber sensor; Low-reflectivity FBG; Time division multiplexing; Narrow wavelength swept laser; Raman amplification



LIU Chuan was born in 1986. Now she is pursuing the M. S. degree at University of Electronic and Science Technology, and her research interests focus on optical fiber communication and sensing.



RAO Yun-jiang was born in 1962. He received his Ph. D. degree in optoelectronic engineering from Chongqing University in 1990. After that, he joined the Optoelectronics Division of Electric and Electronic Engineering Department in Strathclyde University, U. K., as a post-doctoral research fellow. Currently he is the director of Optical Fiber Technology Research Centre and the dean of School Communication and Information Engineering, UESTC and Chang-Jiang Chair Professor, and his research interests focus on optical fiber sensing.