

文章编号: 0258-7025(2007)05-0680-04

基于扫描激光器和光放大的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统

饶云江^{1,2}, 罗小东¹, 冉曾令¹

(¹ 电子科技大学宽带光纤传输和通信网技术教育部重点实验室, 四川 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 提出了对基于扫描激光器的光纤布拉格光栅(FBG)传感系统进行掺铒光纤(EDF)/双波拉曼混合放大的方法,大幅度提高了该光纤布拉格光栅传感系统的传输距离。该方法以高功率扫描激光器作为光源,采用双波长拉曼放大的方法对信号进行低噪声双向放大,再利用系统中间的两段掺铒光纤,将剩余的拉曼抽运功率用来产生自发辐射光和放大传感信号,使得整个系统能在超长的传感距离上获得良好的信噪比(SNR)。实验表明使用一台扫描激光传感分析仪、一只170 mW的拉曼抽运和一只2 W的拉曼抽运,可以使传感距离达到100 km以上,并且传感系统的光纤布拉格光栅反射信号均能获得超过7 dB的良好信噪比,从而实现在超长距离上的光纤布拉格光栅传感。

关键词 光纤光学;光纤传感器;光纤布拉格光栅传感器;扫描激光器;拉曼放大;掺铒光纤放大

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

A 100 km Fiber Bragg Grating Sensor System Based on Swept Laser and Optical Amplification

RAO Yun-jiang^{1,2}, LUO Xiao-dong¹, RAN Zeng-ling²

¹Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China
²Key Laboratory of Opto-Electronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract A novel method of Er-doped optical fiber (EDF) dual-wavelength Raman hybrid amplification for fiber Bragg grating (FBG) sensor system based on swept laser is proposed for achieving ultra-long distance quasi-distributed measurement. Such a method employs a high power swept laser as the light source. Dual-wavelength Raman fiber amplification is adopted to achieve low-noise bidirectional amplification of FBG signals, and two sections of EDFs arranged along the fiber link remotely are used for generation of amplified spontaneous emission (ASE) light to illuminate remotely-located FBG sensors and also amplification of sensor signals with the residual Raman pump power, making the whole sensor system capable of obtaining reasonably good signal-noise-ratio (SNR) for an ultra-long distance. The experimental results show that an optical SNR of ~ 7 dB has been achieved for a 100 km transmission distance with a swept laser, a low Raman pump power of ~ 170 mW at wavelength of 1455 nm and a Raman pump power of ~ 2 W at wavelength of 1480 nm, which leads to realization of FBG-based sensing along ultra-long distance.

Key words fiber optics; optical fiber sensors; fiber Bragg grating sensors; swept lasers; Raman amplification; Er-doped fiber amplification

收稿日期:2006-10-08;收到修改稿日期:2007-01-22

基金项目:国家自然科学基金(60537040)资助项目。

作者简介:饶云江(1962—),男,云南保山人,电子科技大学长江学者特聘教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术与光纤通信器件方面的研究。E-mail:yjrao@uestc.edu.cn

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)作为一种新型的传感器具有良好的稳定性、可靠性、对电磁波的不敏感性、小尺寸、适于在高温、腐蚀性或危险性环境使用的优点^[1~7]。因此各种光纤布拉格光栅传感系统得到了快速的发展,其中基于扫描激光器的光纤布拉格光栅传感系统已经成熟并且商用化。但是由于激光器功率的限制,光纤本身的传输损耗、散射、系统的连接损耗等原因,导致传感信号以及信噪比(SNR)随着传感距离的增加而不断减小,使得这种光纤布拉格光栅传感系统的传输距离受到限制。最近几年,已提出了几种方法来增加光纤布拉格光栅传感系统的传输距离^[8~10],但是所报道的最长距离只有 50 km。但在许多场合,如铁道、输油(气)管道、海岸线等的超长距离遥测中,需要 100 km 及以上的传输距离。因此本文提出了对基于扫描激光器的光纤布拉格光栅传感系统进行掺铒光纤(EDF)/双波长拉曼混合放大的方法,使得整个系统的探测距离能够达到 100 km 以上,同时具有良好的信噪比。

2 系统设计与工作原理

基于扫描激光器的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统进行掺铒光纤/拉曼混合放大的系统结构如图 1 所示。该系统采用扫描激光传感分析仪 si720

的扫描激光器作为光源,并采用分析仪自带的光接收器来获得传感信号。si720 的输出激光经过环形器 1 再通过一个 1550/1450 的波分复用器(WDM1),进入 100 km 的光纤传感系统,WDM1 的 1450 端接一只 1455 nm 的抽运,为传感信号提供拉曼放大。而系统起始端的另一个 1480 nm 抽运经过 50 km 的普通光纤接在 WDM4 的 1450 端再次为传感信号提供拉曼放大,实验采用 160 mW 的 1480 nm 抽运将其直接接在 WDM4 的 1450 端,用来代替 2 W 的拉曼抽运以及 50 km 的普通光纤进行系统模拟。在系统的 25 km 和 75 km 分别还放置了 13.5 m 和 11.5 m 长的掺铒光纤,利用剩余的抽运功率进行掺铒光纤放大。

扫描激光经过 25 km 单模光纤(SMF)的拉曼放大后,经环形器 2 进入掺铒光纤进一步放大,而剩余的抽运能量经过 WDM3 进入掺铒光纤产生放大自发辐射(ASE)光,再经过环形器 3 进入后面 75 km 光纤,提供给 25 km 以后的光纤布拉格光栅进行反射。从后面光纤布拉格光栅反射的光经从两个环形器绕过掺铒光纤,直接进入前 25 km 的光纤,进行拉曼后向放大,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分析仪,从而消除了其对反射信号信噪比的影响。同样地,75 km 处的第二个环形结构的功能与前面描述的不同。

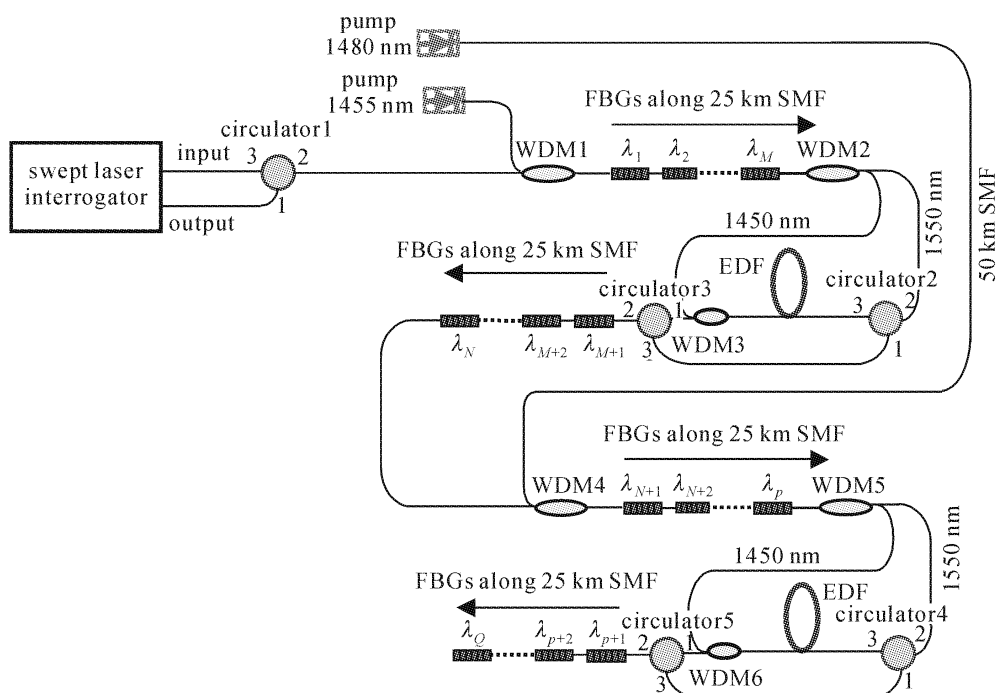


图 1 基于掺铒光纤/拉曼混合放大和扫描激光器的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the 100 km FBG sensing system with hybrid Raman/EDF amplification and a swept laser

实验中采用了美国 MOI 公司生产的扫描激光传感分析仪 si720, 它的扫描波长范围为 1510 ~ 1590 nm, 扫描频率为 5 Hz 或者 0.5 Hz, 精度能够达到 1 pm。

3 实验及结果

首先, 把基于扫描激光器的光纤布拉格光栅传感系统在加入光放大前后进行了对比实验。在系统 50 km 和 100 km 处分别放置了 1548 nm 以及 1556 nm 波长的光纤布拉格光栅, 它们反射信号的谱图如图 2 所示。其中未加光放大时, 系统去掉了掺铒光纤部分, 否则光信号会由于掺铒光纤的吸收产生很大的衰减。

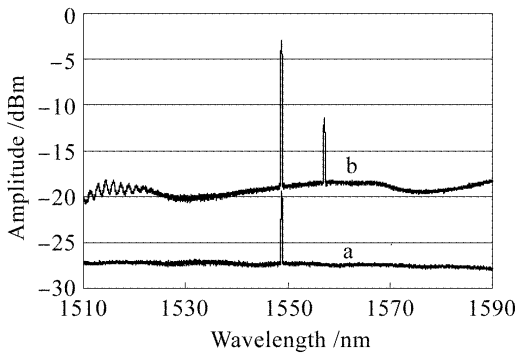


图 2 50 km 和 100 km 处光纤布拉格光栅反射信号的谱图

a: 光放大之前; b: 光放大之后

Fig. 2 Spectra of reflected FBG signals at 50 km and 100 km

a: without amplification; b: with amplification

由图 2 可见在未经过光放大之前, 50 km 处的光纤布拉格光栅反射信号只有 7 dB 的信噪比, 而 100 km 处则基本没有信号。加入光放大之后, 50 km 处的光纤布拉格光栅反射信号的信噪比提高了 15 dB, 而 100 km 处的信噪比则达到了 7 dB。由于 2 W 的抽运经过 50 km 普通光纤后的输出功率比实验中直接接入的 160 mW 抽运实际功率还要大, 所以按照系统原设计还可以获得更高的信噪比。

为了验证系统能够在 100 km 的超远距离上进行传感测量, 对 100 km 处的光纤布拉格光栅进行了温度和静态应变实验。

将 100 km 处的光纤布拉格光栅置于恒温箱中, 使用分析仪来测量反射波长随温度的变化, 设定温度的变化范围为 -40 ~ 70 °C, 每隔 10 °C 记录一次数据, 并做线性拟合, 实验结果如图 3。

采用微动台对 100 km 处的光纤布拉格光栅进

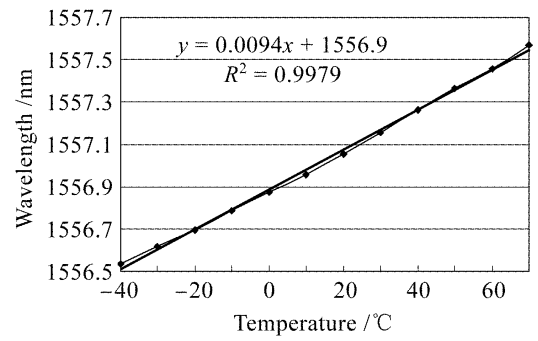


图 3 光纤布拉格光栅波长与温度的关系

Fig. 3 Relationship between FBG wavelength and temperature

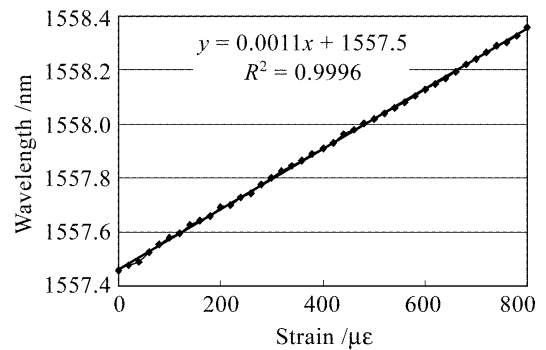


图 4 光纤布拉格光栅波长与应变的关系

Fig. 4 Relationship between FBG wavelength and strain

行静态应变实验, 使用分析仪来测量反射波长随应变的变化, 每 20 个微应变测量一次数据, 测量 40 组, 并做线性拟合, 实验结果如图 4。

从图 3, 图 4 可以看出光纤布拉格光栅的反射波长与温度、应变的线性相关系数 R 的平方值分别为 0.9979 和 0.9996, 具有很好的线性关系, 说明经过光放大后本系统完全可以应用于超远距离的温度和应变的测量。

4 结论

提出了采用掺铒光纤/拉曼混合放大的方法以提高基于扫描激光器的准分布式光纤布拉格光栅传感系统的传输距离。该方法在 100 km 的光纤布拉格光栅传感系统上进行双向拉曼放大, 以及利用其剩余功率同时进行掺铒光纤放大, 在 100 km 的传感距离上获得了 7 dB 的良好信噪比。同时由于扫描激光器的波长范围较宽, 使得可以在网络上分布大量的光纤布拉格光栅。这种经过光放大的光纤布拉格光栅传感系统具有良好的应用前景, 可以较低的成本来实现超长距离的准分布式传感网络, 用于超长距离的多点遥测, 如铁道、输油(气)管道、海岸线、边

防线等。

参 考 文 献

- 1 Y. J. Rao. In-fibre Bragg grating sensors [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**:355~375
- 2 Rao Yunjiang, Ran Zengling. Recent advances in long-distance FBG sensor system at UESTC [J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2006, **4**(3):232~236
- 3 Liu Lihui, Zhang Weigang, Guo Honglei *et al.*. Study on experiment of fiber Bragg grating pressure sensitivity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1265~1268
刘丽辉, 张伟刚, 郭宏雷 等. 光纤布拉格光栅压力增敏的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10):1265~1268
- 4 Chen Zhemin, Chen Jun, Wu Xiaodong *et al.*. Real-time measurement of harmonic frequency with fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1230~1234
陈哲敏, 陈 军, 吴晓冬 等. 基于布拉格光纤光栅谐振频率的实时测量[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1230~1234
- 5 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Sun Lei *et al.*. Study on transversal strain on fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1508~1512
- 6 涂勤昌, 张伟刚, 孙 磊 等. 光纤布拉格光栅横向应变特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1508~1512
- 6 Li Dongsheng, Liang Dakai, Pan Xiaowen. Experimental study of fiber grating smart layer system based on fiber Bragg grating sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1166~1170
李东升, 梁大开, 潘晓文. 基于光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层实验研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9):1166~1170
- 7 Xu Wang, Chongxiu Yu, Zhihui Yu *et al.*. Sampled phase shift fiber Bragg gratings [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4):190~191
- 8 C. P. Peng, Y. T. Hong, C. Sien. Long distance FBG sensor system using a linear-cavity fiber Raman laser scheme [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2):575~577
- 9 J. H. Lee, Y. G. Han, Y. M. Chang *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
- 10 Y. J. Rao, Z. L. Ran, R. R. Chen. 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