

超长距离光纤布拉格光栅传感系统

饶云江^{1,2}, 封 莎¹, 冉曾令², 蒋 祺²

(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 成都 611731;

2. 重庆大学光电技术与系统教育部重点实验室 重庆 沙坪坝区 400044)

【摘要】提出了基于可调激光器和声光脉冲调制的光纤布拉格光栅(FBG)传感系统,同时利用掺铒光纤放大器(EDFA)和拉曼放大相结合的放大方案大幅度提高了光纤布拉格光栅传感系统的传输距离,达到了300 km的超长距离传感。该系统通过前端的EDFA和末端的拉曼泵浦光源来补偿光纤布拉格光栅反射的光功率。系统在低于275 km长度时获得了大于15 dB的优良信噪比;在300 km处获得了4 dB的信噪比,以及明显的反射信号。系统在100,200,250,300 km处的静态应变实验中,线性度均达到了0.999以上。系统可望在铁道、输油(气)管道、海岸线等的超长距离遥测中得到广泛应用。

关键词 掺铒光纤放大器; 光纤布拉格光栅; 拉曼放大; 超长距离传感系统

中图分类号 TN212.14; O332

文献标识码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.05.013

Ultra-Long Distance Fiber Bragg Grating Sensor System

RAO Yun-jiang^{1,2}, FENG Sha¹, RAN Zeng-ling², and JIANG Qi²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technology,

University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Opto-Electronic Technology & Systems, Chongqing University Shapingba Chongqing 400044)

Abstract A novel tunable fiber ring laser configuration with a combination of Raman amplification and erbium-doped fiber amplification (EDFA) is proposed for realizing high signal-to-noise ratio (SNR), ultra-long distance (300 km) fiber Bragg grating (FBG) sensor systems. The hybrid Raman-EDF amplification configuration can enhance the optical SNR of FBG sensor signals significantly, so the optical power reflected by the fiber Bragg grating can be compensated. A good optical SNR of 15 dB is achieved for a 275 km transmission distance, which is the best performance to our knowledge, and about 4 dB at 300 km. In the static strain experiments with fiber lengths of 100,200,250,300 km, the linearity is greater than 0.999. This system can be widely used in the ultra-long-distance sensing applications such as railways, oil(gas) pipelines and coastline.

Key words EDFA; FBG; Raman amplification; ultra-long distance sensor system

光纤布拉格光栅作为一种新型的传感器具有良好的稳定性、可靠性,以及小尺寸和对电磁波不敏感性,适于在高温、腐蚀性或危险性环境使用^[1-3]。因此,基于光纤布拉格光栅的各种传感系统得到了快速的发展,部分光纤布拉格光栅传感系统已经较为成熟并已商用化^[4]。但是,由于激光器功率的限制、光纤本身的传输损耗、散射及器件间连接损耗等原因,导致随着传感距离的增加,传感信号的功率和系统信噪比(SNR)大幅度降低,使光栅传感系统的传输距离受到限制^[5]。在许多场合,如铁道、输油(气)管道、海岸线等超长距离遥测中,需要能传输上百公里甚至几百公里距离且信噪比优良的系

统。近年来,已有增加光纤布拉格光栅传感系统的传输距离^[6-11]的报道。文献[10]提出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,实现了100 km长距离FBG传感系统,其信噪比约为7 dB。文献[11]提出基于EDFA的FBG传感系统,实现了230 km长距离FBG传感系统,但其信噪比仅有4 dB,且对系统光源要求高。因此本文提出了对基于可调激光器的光纤布拉格光栅传感系统进行EDFA/FRA混合放大的方法,使整个系统的探测距离能够达到300 km,并具有良好的信噪比。

1 实验原理

实验系统装置如图1所示。从光源发出的扫描光经过声光调制器后形成脉冲光,经EDFA放大后

收稿日期: 2010-01-30; 修回日期: 2011-06-09

基金项目: 国家863项目(2007AA01Z245); 教育部博士点基金(A0901010120060614017)

作者简介: 饶云江(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感与通信技术方面的研究。

进入一个 99:1 的耦合器, 99% 的脉冲光作为信号光从环行器 1 端口进入, 经环行器 2 端口进入光纤, 后向泵浦经过波分多路复用(wavelength division multiplex, WDM) 进入光纤对信号光进行拉曼放

大, 从放置在光纤末端的 FBG 反射回的信号光经环行器 3 端口进入探测器, 与 1% 的脉冲光(用于校正光源功率抖动)一起进入信号处理单元, 最后经过计算机处理并显示结果。

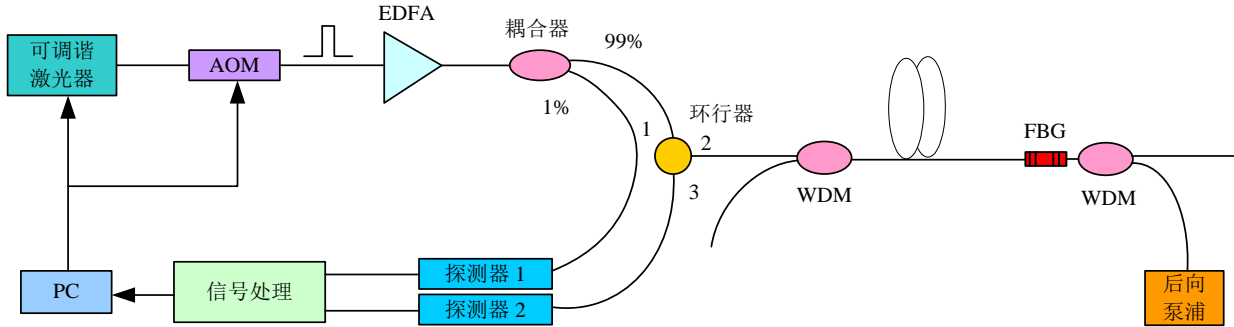


图1 实验系统装置

图2所示为探测器2得到的时域信号示意图。设 FBG 的中心波长为 λ_{FBG} , 反射率为 R_{ref} , 传输光纤长度为 L , 折射率为 n , 那么 FBG 反射谱的功率为:

$$P_{\text{FBG}} = R_{\text{ref}} P_0 e^{-2\alpha L}$$

式中, P_0 为光源的输出功率; α 为传输光纤的损耗^[12]。

瑞利散射光功率可描述为:

$$P_{\text{RS}} = R P_0 \sinh\left(\frac{\alpha c}{2n} \omega\right) e^{-\frac{\alpha c}{n} t}$$

式中, ω 为波长扫描时间(即输出时间); R 为光纤中产生瑞利散射光的系数; 瑞利散射光的衰减率为 $\alpha c/n$ 。

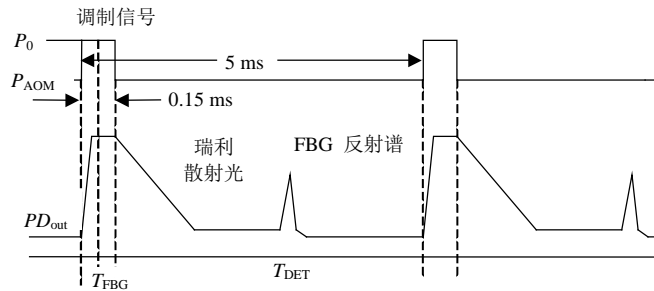


图2 探测器信号示意图

如果波长为 λ_{FBG} 的光从光源输出的时间为 T_{FBG} , 那么 FBG 反射谱被探测的时间为:

$$T_{\text{DET}} = T_{\text{FBG}} + \frac{2nL}{c}$$

被探测到的 FBG 的信噪比可描述为:

$$\text{SNR}_{\text{RBG}} = R \sinh\left(\frac{\alpha c}{2n} \omega\right) e^{-\frac{\alpha c}{n} T_{\text{FBG}}}$$

通常, α 和 R 分别取值为 0.2 dB/km 和 0.002 2。

本文系统中, 由计算机控制光源与声光调制器的同步。光源为一个波长可调谐的激光器(gilent_81642A), 波长扫描范围为 1 520~1 600 nm, 实验中设定扫描范围为 1 550~1 570 nm, 扫描方式为 step, 设置扫描步长为 0.01 nm。计算机控制的调制频率为 200 Hz。系统加入的后向泵浦光波长为 1 480 nm(测得在 1 560 nm 波长处的拉曼增益系数约

为 $0.54 \times 10^{-13} \text{ m/W}$), 用于对信号进行拉曼放大, 在其前端加入 WDM, 用于滤除剩余的后向泵浦光以及所产生的噪声, FBG 在不受应力时中心波长为 1 560 nm, 带宽为 0.2 nm, 反射率为 0.89。标准单模光纤的损耗系数约为 0.2 dB/km。在本文系统信号处理单元中, 由两探测器分别探测 FBG 反射信号与输入光信号, 将 FBG 反射信号与输入光信号相除以消除光源本身的抖动对 FBG 反射信号强度的影响。

2 实验结果及分析

图 3 所示为 FBG 分别安放在系统 50, 100, 200, 250, 275, 300 km 处的反射谱。当 FBG 安放在 50 km 和 100 km 处时, 由于入射光强度很大, 所以 FBG 反射信号非常强, 此时未加入后向泵浦放大, 当系统超过 200 km 处时, 由于传输光纤距离延长引起信号光损耗过大, 反射回来的 FBG 信号光已经非

常微弱, 此时加入后向泵浦对信号光进行放大, 实现了系统距离延长至 300 km。本文系统中 200,250,275,300km 处的泵浦功率分别为 0.56,0.76,0.92,1.1W。如图4所示, 在50 km与100 km 处未加入后向泵浦时, 系统的信噪比均在 25 dB以

上, 当系统延长至200 km并加入后向泵浦后, 系统的信噪比为28.5 dB, 比100 km不加泵浦时还要好。随着距离的增加, FBG反射信号减弱, 整个系统的信噪比也不断下降, 但是在300 km处信噪比仍然达到了4 dB, 反射信号亦非常明显。

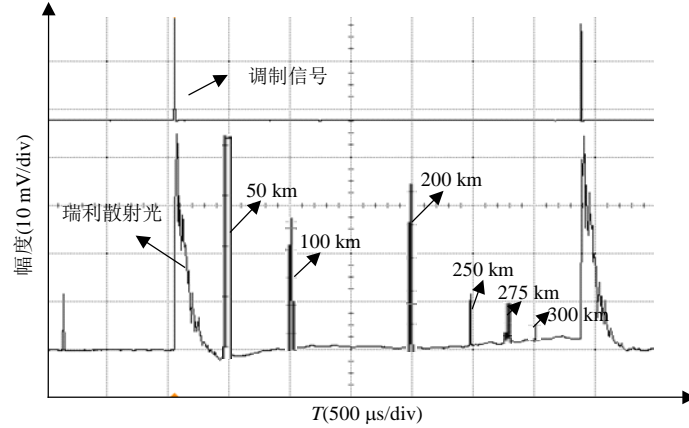


图3 FBG反射信号的实验测量图

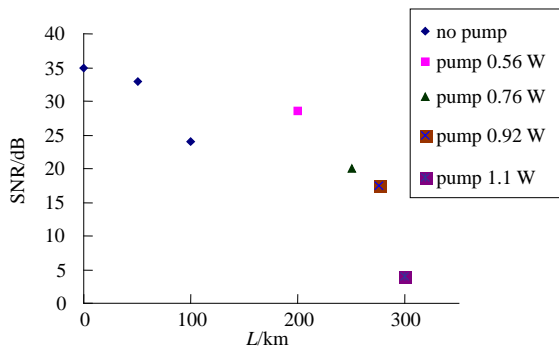


图4 不同距离处FBG反射信号的信噪比

如图5所示分别为系统在100,200,250,300 km处的静态应变实验, 从图中可以很明确地看出不管FBG安放在系统的哪个位置, 其静态应变的线性度均在0.999以上。

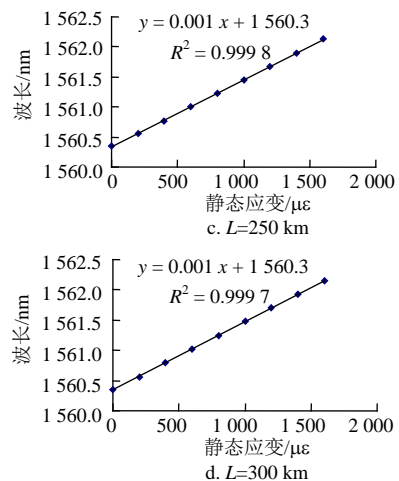
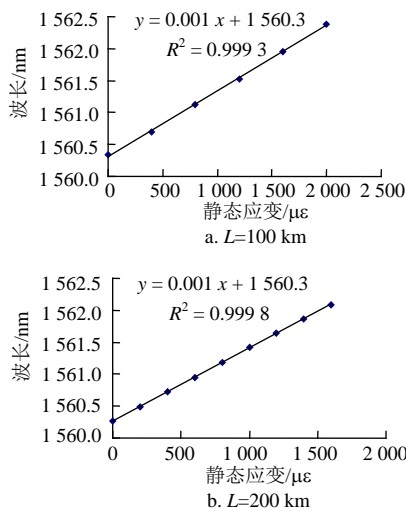


图5 不同距离处FBG静态应变实验



3 结论

本文系统采用可调激光器作为光源, 发出的扫描光经过声光调制器后成为脉冲光。脉冲光经EDFA放大再经拉曼放大, 系统传输距离低于275 km时信噪比大于15 dB, 并在此基础上实现了300 km超长距离的FBG传感。系统中, FBG在不同距离处的静态应变线性度均在0.999以上, 故系统可用于超长距离应变监测。通过优化系统参数以及光放大方案有望进一步延长系统传输距离。

参 考 文 献

[1] KERSEY A D, DAVIS M A. Fiber grating sensors[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15: 1440- 1442.

(下转第736页)

- of load test suites and the assessment of the resulting software[J]. IEEE Transaction on Software Engineering, 1995, 21(9): 705-715.
- [4] 颜炯, 王戟, 陈火旺. 基于UML的软件Markov链使用模型构造研究[J]. 软件学报, 2005, 16(8): 1386-1394.
YAN Jiong, WANG Ji, CHEN Huo-wang. Deriving software markov chain usage model from uml models[J]. Journal of Software, 2005, 16(8): 1386-1394.
- [5] HU Hai, JIANG Chang-hai, CAI Kai-yuan. Adaptive software testing in the context of an improved controlled Markov chain model[J]. IEEE on Computer Software and Applications, 2008, 32: 853-858.
- [6] STACY J P, CARMEN J T, RICHARD C L, et al. 净室软件工程: 技术与过程[M]. 贾可荣, 张志祥, 张秀山, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2001.
STACY J P, CARMEN J T, RICHARD C L, et al. Cleanroom software engineering: Process and technology[M]. Translated by BI Ke-rong, ZHANG Zhi-xiang, ZHANG Xiu-shan, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.
- [7] POORE J H. Introduction to the special issue on: model-based statistical testing of software intensive systems[J]. Information and Software Technology, 2000, 42(12): 797-799.
- [8] 沙晓婷. 统计方法在软件测试中的研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
SHA Xiao-ting. Research and implementation on software testing with statistical method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [9] 高海昌, 冯博琴, 曾明, 等. 基于Markov链路径使用模型的软件统计测试[J]. 计算机工程, 2006, 32(19): 20-22.
GAO Hai-chang, FENG Bo-qin, ZENG Ming, et al. Statistical software test based on Markov chain path usage model[J]. Computer Engineering, 2006, 32(19): 20-22.
- [10] 沈海华, 卫文丽, 陈云霁. 覆盖率驱动的随机测试生成技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(4): 419-431, 441.
SHEN Hai-hua, WEI Wen-li, CHEN Yun-ji. A survey on coverage directed generation technology[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(4): 419-431, 441.
- [11] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论, 应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic algorithm-theory, application and software implementation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [12] 马春燕, 胡飞, 张云鹏. 基于Markov链使用模型的组件复用的统计测试[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(4): 1051-1053, 1056
MA Chun-yan, HU Fei, ZHANG Yun-peng. Statistical testing of component reuse using Markov chain usage model[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(4): 1051-1053, 1056

编辑 黄 莘

(上接第705页)

- [2] RAO Yun-jiang. In-fibre Bragg grating sensors[J]. Meas Sci Technol, 1997, 8: 355-375.
- [3] RAO Yun-jiang. Recent progress in application of in-fiber Bragg grating sensors[J]. Opt & Laser in Eng, 1999, 31: 290-297.
- [4] 鲍吉龙, 章献民, 陈抗生, 等. FBG传感网络技术研究[J]. 光通信技术, 2001, 25(2): 84-89.
BAO Ji-long, ZHANG Xian-min, CHEN Kang-sheng, et al. The research of FBG sensing network technology[J]. Optical Communication Technology, 2001, 25(2): 84-89.
- [5] 饶云江, 王义平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
RAO Yun-jiang, WANG Yi-ping, ZHU Tao. The principle and application of fiber grating[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [6] PENG P C, TSENG H Y, CHI S. Long-distance FBG sensor using a linear-cavity fiber Raman laser scheme[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16: 575-580.
- [7] 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: 127-131.
- [8] 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.
- [9] RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling, 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.
- [10] 饶云江, 罗小东, 冉曾令. 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[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 680-683.
RAO Yun-jiang, LUO Xiao-dong, RAN Zeng-ling. 100 km FBG sensing system based on scan laser and optical amplification[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(5): 680-683.
- [11] TAKANORI S, KENICHI N, YOSHIFUMI T, et al. Ultra-long-distance (230 km) FBG sensor system[C]//Proc of 19th International Conference on Optical Fibre Sensors. Perth, Western Australia: David Sampson, 2008, 7004: 70046C-70046C4.
- [12] 吴健, 严高师. 光学原理教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
WU Jian, YAN Gao-shi. Optical principle tutorial[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.

编辑 张 俊