

文章编号: 0253-2239(2007)08-1393-4

# 基于光纤环形激光器和光放大的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统\*

罗小东<sup>1</sup> 饶云江<sup>1,2</sup> 冉曾令<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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 610054)  
(<sup>2</sup> 重庆大学光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 在基于掺铒光纤-拉曼混合放大的可调光纤环形激光器的光纤布拉格光栅(FBG)传感系统结构基础上,提出了延长传感距离的新方法。该方法以环形掺铒光纤激光器作为光源,采用双波长拉曼放大的方法对信号进行低噪声的双向放大,系统中间的两段掺铒光纤再利用剩余的抽运功率产生自发辐射光和放大传感信号,使得整个系统能够在超长的传感距离上获得很高的信噪比。实验表明使用一只 40 mW 的掺铒光纤放大(EDFA)抽运源、一只 170 mW 的拉曼抽运源和一只 2 W 的拉曼抽运源,可以使整个系统的传感距离达到 100km,并且传感系统的光纤布拉格光栅反射信号均能获得超过 57 dB 的优良信噪比,从而实现在超长距离上的光纤布拉格光栅传感。

**关键词:** 光通信; 光纤传感器; 光纤布拉格光栅; 光纤激光器; 拉曼放大; 掺铒光纤放大

中图分类号: TP212.14 文献标识码: A

## 100 km Fiber Bragg Grating Sensor System Based on Fiber Ring Laser and Optical Amplification

Luo Xiaodong<sup>1</sup> Rao Yunjiang<sup>1,2</sup> Ran Zengling<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu 610054  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract:** A novel method based on a tunable fiber ring laser configuration with Er-doped fiber Raman hybrid amplification is proposed for performance enhancement of long-distance in-fiber Bragg grating (FBG) sensor systems to achieve quasi-distributed measurement. Such a method employs a tunable Er-doped fiber ring laser as light source. Dual-wavelength Raman fiber amplification is adopted for achieving low-noise bidirectional amplification of FBG signals, and two sections of EDFs, arranged in the fiber link remotely, are used for generation of amplified spontaneous emission with residual pump power to illuminate remotely-located FBG sensors and amplification of sensing signals, which makes the whole sensor system capable of achieving quite high signal-noise-ratio along ultra-long distance. Experimental results show that an excellent optical signal-noise-ratio of  $\sim 57$  dB has been achieved for a 100 km transmission distance with a low Er-doped fiber amplification pump power of  $\sim 40$  mW at wavelength of 980 nm, a low Raman pump power of  $\sim 170$  mW at wavelength of 1455 nm and a Raman pump power of  $\sim 2$  W at wavelength of 1480 nm, leading to FBG-based sensing along ultra-long distance.

**Key words:** optical communications; optical fiber sensor; fiber Bragg grating; fiber ring laser; Raman amplification; Er-doped fiber amplification

\* 国家自然科学基金重点项目(60537040)资助课题。

作者简介: 罗小东(1983—),男,四川遂宁人,硕士研究生,主要从事光纤传感技术与光纤通信器件等方面的研究。

E-mail: luos19831982@163.com

导师简介: 饶云江(1962—),男,云南保山人,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

收稿日期: 2006-08-22; 收到修改稿日期: 2006-12-20

# 1 引 言

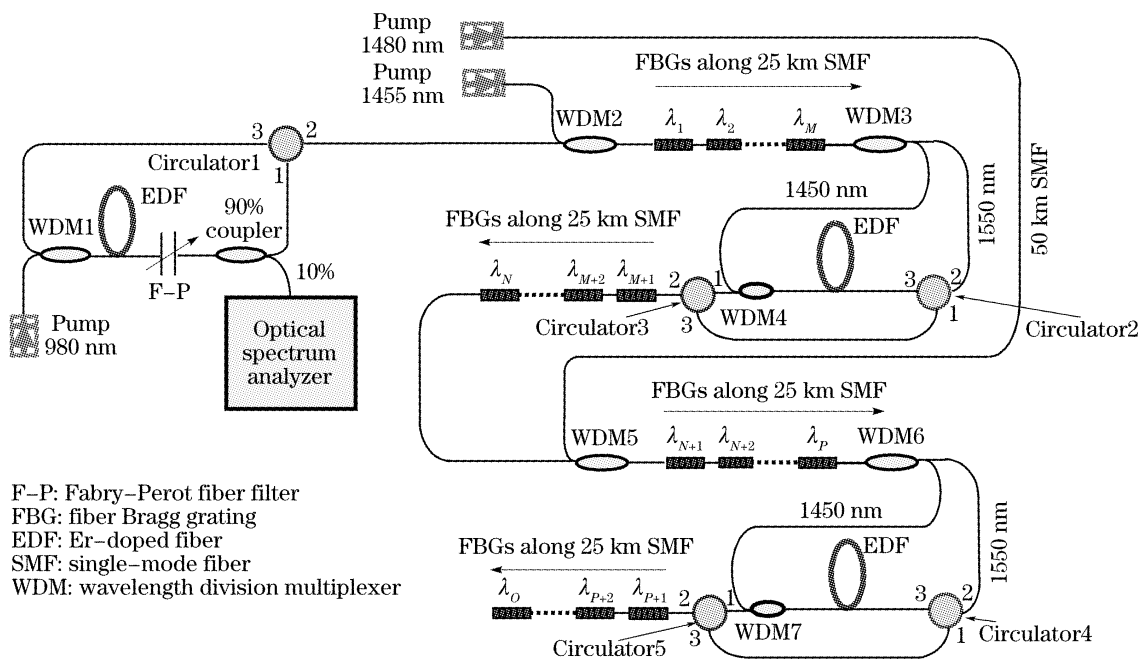
光纤布拉格光栅(FBG)作为一种新型的传感器具有良好的稳定性、可靠性、对电磁波的不敏感性、小尺寸、适于在高温、腐蚀性或危险性环境使用的优点<sup>[1~3]</sup>。但是由于光纤本身的传输损耗、散射、系统的连接损耗等原因,导致传感信号以及信噪比随着传感距离的增加而不断减小,使得光纤布拉格光栅传感系统的检测距离受到了限制。

在光纤布拉格光栅传感系统中,采用宽带光源的光纤布拉格光栅传感系统的传输距离一般是25km左右,如 Pengchun Peng 等提出使用基于光纤布拉格光栅和光纤环路反射的线性腔光纤拉曼激光器结构,它无须额外的宽带光源,探测长度达到25 km,获得了较高的信噪比(50 dB),但是该方案需要的抽运功率较大(大于 600 mW)<sup>[4]</sup>。为了增加传感信号的传输距离达到远距离传感的目的,在传感信号传输光纤上进行拉曼放大的方法被提了出来,探测长度达到了 50 km,如 Nakajima 等提出的拉曼分布式放大光纤布拉格光栅传感系统,它对传感信

号在传输光纤上进行分布式放大,以及 J. H. Lee 等提出的拉曼分布式放大并利用拉曼抽运剩余功率对宽带光源进行掺铒光纤放大的方法,均获得了 50 km 的探测距离,但是都存在抽运功率较大的问题<sup>[5]</sup>。而我们提出的基于掺铒光纤-拉曼混合放大的光纤激光器光纤布拉格光栅传感系统,使用较小功率的抽运便可以获得50 km上的一致的超过58 dB 的优良信噪比,而且波长扫描光源方式使得可以在网络上分布大量的光纤布拉格光栅<sup>[6]</sup>。

# 2 系 统

实验构造的基于掺铒光纤-拉曼混合放大和光纤激光器的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统如图 1 所示。该系统采用了环形掺铒光纤激光器产生激光作为光源,使用波长扫描光源方式来获得传感信号,在 100 km 的传输距离上使用了一只 170 mW 的 1455 nm 拉曼抽运源、一只 2 W 的 1480 nm 拉曼抽运源以及两段掺铒光纤(EDF)对传输信号进行掺铒光纤-拉曼混合放大,以获得良好的信噪比。



F-P: Fabry-Perot fiber filter  
 FBG: fiber Bragg grating  
 EDF: Er-doped fiber  
 SMF: single-mode fiber  
 WDM: wavelength division multiplexer

图 1 基于掺铒光纤-拉曼混合放大和光纤激光器的 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 based on a tunable fiber ring laser configuration

光纤激光器采用了 980 nm 激光二极管作为抽运源,其发出的光经过一只 980 nm/1550 nm 的波分复用器(WDM)进入掺铒光纤,再经过可调法布里-珀罗光纤滤波器(F-P),耦合器将光分为两束,10%的光进入光谱仪,90%的光经过环形器 1(circulator 1)进入1550 nm/1450 nm的 WDM2,然后进入 100 km 的光纤传感系统,WDM2 的 1450 nm 端

接一只1455 nm的抽运源,为传感信号提供拉曼放大。而在 100 km 的光纤上分布着一系列不同反射波长的光纤布拉格光栅作为传感器,本实验在 25 km、50 km、75 km 以及 100 km 处分别放置了 1544 nm,1548 nm,1552 nm,1556 nm 波长的 4 个光纤布拉格光栅。在系统的 25 km 和 75 km 分别放置了13.5 m和 11.5 m 长的掺铒光纤(EDF),利

用剩余的抽运功率进行掺铒光纤放大。而系统起始端的 1480 nm 抽运经过 50 km 的单模光纤(SMF)接在 WDM5 的 1450 nm 端再次为传感信号提供拉曼放大,实验中我们采用 160 mW 的 1480 nm 抽运将其直接接在 WDM5 的 1450 nm 端,用来代替 2 W 的拉曼抽运源以及 50 km 的单模光纤进行系统模拟。

按照系统设计,第一段掺铒光纤宽带光源产生的放大自发辐射光经过 25 km 光纤的拉曼放大后,经环行器 2 进入掺铒光纤进一步放大,而剩余的抽运能量经过 WDM4 进入掺铒光纤产生自发放大辐射光,再经过环行器 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两个环行器绕过掺铒光纤,直接进入前 25 km 的光纤,进行拉曼后向放大,以提高信号的信噪比。同时,由于环行器的方向选择性,环形结构中掺铒光纤产生的自发放大辐射后向光不能返回光谱仪,从而消除了其对反射信号信噪比的影响。同样地,50 km 处的 1480 nm 抽运源以及 75 km 处的第二个环形结构的功能与前面描述的不同。

而系统第一段掺铒光纤在 980 nm 抽运光的作用下首先会产生 1550 nm 左右的光,在一定的反馈条件和选频器件的作用下,可在掺铒光纤的增益谱中任一点产生激光振荡。返回环形掺铒光纤激光器结构的光波长由可调法布里-珀罗滤波器和光纤布拉格光栅决定,由于掺铒光纤的增益带宽远远大于可调法布里-珀罗滤波器和光纤布拉格光栅的带宽,所以激光模式的选择就决定于可调法布里-珀罗滤波器和光纤布拉格光栅<sup>[7~10]</sup>。本实验的环形掺铒光纤激光器结构中,可调法布里-珀罗滤波器仅允许很窄频带的光通过,可以有效地滤掉通带外的噪声从而提高系统的信噪比并获得较高的输出功率。通过调节法布里-珀罗滤波器来改变其通带频率为  $c/\lambda$ ,当  $\lambda$  与光纤布拉格光栅的工作波长相同时,光信号被分布在光纤上的光纤布拉格光栅反射,通过环行器 1 进入环形结构,在环形结构中以逆时针方向传播一周,由掺铒光纤对光信号进行放大,形成正反馈环路振荡,当所获增益大于腔内损耗时,便产生了激光输出。调节法布里-珀罗滤波器的通带频率,使得不同中心波长的光纤布拉格光栅传感信号依次出现,从而实现多个光纤布拉格光栅反射波长信号的扫描。

实验中采用的是美国 Newport 公司生产的

可调法布里-珀罗滤波器,滤波器调谐范围为 1535~1565 nm,由旋钮调节通带波长。实验所设计的环形激光器可在该范围内获得稳定的激光输出。

### 3 实验结果与讨论

系统 100 km 处的 1556 nm 波长的光纤布拉格光栅反射信号的谱图如图 2 所示。由图 2 可见即使在 100 km 的超远距离,系统仍获得到 57 dB 的信噪比,由于 2 W 的抽运源经过 50 km 单模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。

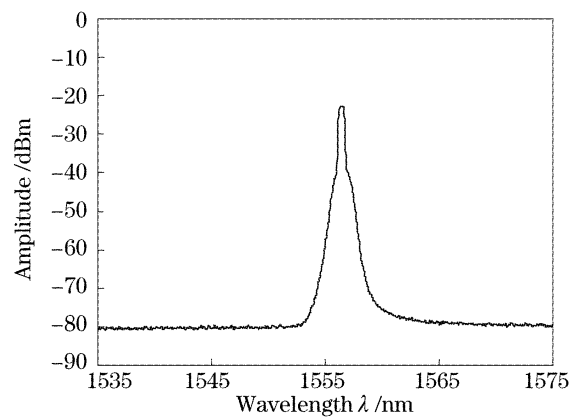


图 2 100 km 处光纤布拉格光栅反射信号的谱图  
Fig. 2 Spectrum of reflective FBG signal at 100 km

将 100 km 处的光纤布拉格光栅置于恒温箱中,使用多波长计来测量反射波长随温度的变化,设定温度的变化范围为  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,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 3。

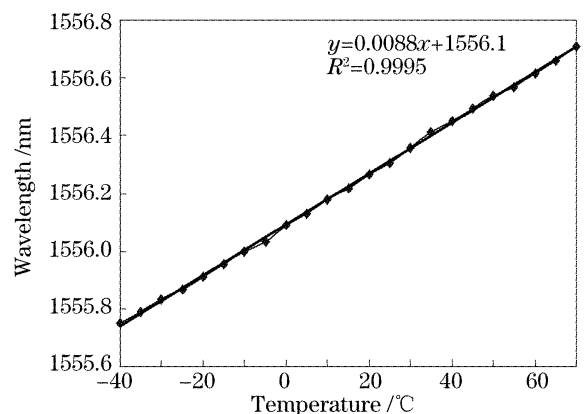


图 3 光纤布拉格光栅波长与温度的关系  
Fig. 3 Relationship between FBG wavelength and temperature

采用微动台对 100 km 处的光纤布拉格光栅进行静态应变实验,使用多波长计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 50 组,并作线性拟合,实验结果如图 4。

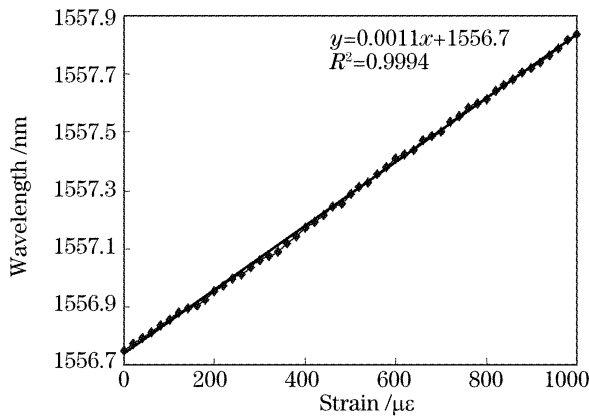


图 4 光纤布拉格光栅波长与应变的关系

Fig. 4 Relationship between FBG wavelength and strain

从传感系统中光纤布拉格光栅的温度与应变实验可以看出,对光纤布拉格光栅的反射波长与温度、应变的关系做线性拟合,它们线性相关系数  $R$  的平方值分别为 0.9995 和 0.9994,具有很好的线性关系,说明本系统完全可以应用于温度和应变的测量。

假设一个光纤布拉格光栅占用 2 nm 的波长范围,本系统可以使用 20 个光纤布拉格光栅传感器,如果采用可调谐波长范围更宽的光纤滤波器,同时优化光放大系统,可使系统的波长范围包含 L 波段<sup>[11]</sup>,达到 80 nm 左右,这样光纤布拉格光栅传感器的个数可增加到 40 个左右。

由于系统在 100 km 处还有 57 dB 的信噪比,系统的传输距离还可以继续延长。设系统放入 40 个光纤布拉格光栅,每个的插入损耗是 0.2 dB,一个来回插入损耗就是 0.4 dB,共损耗 16 dB,系统还剩 41 dB 的余量。为保证探测信号的质量,可以给系统保留 10 dB 的裕度,则系统还剩 31 dB 的余量,设光纤衰减损耗 0.2 dB/km,一个来回就是 0.4 dB/km,所以系统还可以传输 75 km,达到 175 km 的距离。

## 4 结 论

采用了双波拉曼放大,提高了准分布式光纤布拉格光栅传感系统的传输距离。实验结果表明在基于掺铒光纤-拉曼混合放大的环形光纤激光器结构上,该方法在 100 km 的光纤系统上进行双向拉曼放大,以及利用其剩余功率进行掺铒光纤放大,在

100 km 上均获得超过 57 dB 的优良信噪比,最远传感距离可望达到 175 km 左右。这种传感系统具有良好的应用前景,可用于监测复杂结构或者是长距离的多点遥测。

## 参 考 文 献

- 1 Yun Jiang 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]. *J. Electronic Science and Technology of China*, 2006, **4**(3): 232~236
- 3 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 (in Chinese)
- 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试验研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1166~1170
- 4 Pengchun Peng, Hong Yih Tseng, Cien Chi. Long distance FBG sensor system using a linear-cavity fiber Raman laser scheme[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 575~577
- 5 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
- 6 Yunjiang Rao, Zengling Ran, Rongrui 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
- 7 Yang Xiufeng, Zhao Donghui, Ge Chunfen *et al.*. Research on the output characteristics of fiber ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1193~1196 (in Chinese)
- 杨秀峰,赵东晖,葛春风等. 光纤环形腔激光器输出特性的研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1193~1196
- 8 Xia Jiangzhen, Cai Haiwen, Ren Hon *et al.*. Study on output characteristics of erbium-doped fiber ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 823~827(in Chinese)
- 夏江珍,蔡海文,任虹等. 掺铒光纤环形腔激光器输出特性的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 823~827
- 9 Yu Benli, Sun Zhipei, Qian Jingren. Experimental research on dual-tunable  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber ring resonator filter[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(2): 163~166 (in Chinese)
- 俞本立,孙志培,钱景仁. 双可调谐掺铒光纤环形腔滤波器的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 163~166
- 10 Changgui Lu, Zhuyuan Wang, Binfeng Yun *et al.*. Stable single frequency Er-doped all-fiber ring laser with fiber Bragg grating Fabry-Perot filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(4): 212~214
- 11 Dong Xinyong, Zhao Chunliu, Guan Baiqu *et al.*. Output characteristics of tunable fiber ring laser; modeling and experimentation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(12): 2750~2754 (in Chinese)
- 董新永,赵春柳,关柏鸣等. 可调谐光纤环形腔激光器输出特性的理论与实验研究[J]. *物理学报*, 2002, **51**(12): 2750~2754