

## 超长距离光纤随机激光多点传感系统的设计与实现

曹健华, 林圣淘, 王子南\*, 韩冰, 饶云江

电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

**摘要** 自光纤随机激光器概念提出以来, 光纤随机激光已经在光纤激光、光纤传感等领域得到了广泛关注。将光纤随机激光与光纤光栅相结合, 基于光纤光栅的光谱变化信息可以实现高性能点式传感系统, 因此, 此类系统的光谱特征决定了传感距离、精度和复用能力等关键参数。针对高阶随机激光多点传感系统中光谱特性仿真这一关键问题, 对传统的高阶随机激光功率稳态模型进行改进, 所提出的模型的光谱仿真结果均与实验高度吻合。基于该仿真模型, 设计并实现了长达 150 km 的高阶光纤随机激光多点传感系统。同时, 实验得到的传感信号波长与应变的线性拟合度高达 0.999, 充分验证了该系统的传感性能。

**关键词** 光纤激光器; 光纤光栅; 光学传感; 受激拉曼散射; 瑞利散射

中图分类号 O437.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306006

## Design and Implementation for Ultra-Long-Distance Multi-Point Sensing System Based on Random Fiber Laser

Cao Jianhua, Lin Shengtao, Wang Zinan\*, Han Bing, Rao Yunjiang

Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

**Abstract** Since the concept of random fiber laser was proposed, it has received extensive attentions in the fields of fiber lasers, fiber sensing, etc. Combining random fiber laser with fiber grating, high performance point-sensing system can be realized based on spectral change information of fiber grating. Therefore, the spectral characteristics of this system determine key parameters such as sensing distance, accuracy and multiplexing capability. Aiming at the key issue of high-order random laser multi-point sensing system, i.e., spectral characteristics simulation, this paper improves the traditional high-order random laser power balance model, and the spectral simulation results of the proposed model are in good agreement with the experiment. Based on the simulation model, a high-order random fiber laser multi-point sensing system with a length of 150 km is designed and realized. At the same time, the fitting linearity of the sensing signal wavelength and strain obtained from the experiment is as high as 0.999, which fully verifies the system's sensing performance.

**Key words** fiber lasers; fiber grating; optical sensing; stimulated Raman scattering; Rayleigh scattering

**OCIS codes** 060.3510; 280.4788; 290.5910; 290.5870; 060.3735

## 1 引言

激光已经在医疗、工业和军事等方面发挥着重要的作用<sup>[1-3]</sup>, 成为了一项伟大的发明。自 2010 年

Turitsyn 等<sup>[4]</sup>提出光纤随机激光器概念开始, 光纤随机激光器已成为激光学的一个重要研究方向, 相关研究人员对此类激光器进行不断的探索, 揭示了其具有大范围波长可调性<sup>[5-10]</sup>、窄线宽<sup>[11-12]</sup>、高功

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61635005, 61731006)、国家万人计划青年拔尖人才项目(W030211001001)、四川省杰出青年科技人才项目(2020JDJQ0024)、111 计划项目(B14039)

通信作者: \*znwang@uestc.edu.cn

率输出<sup>[13-17]</sup>、低空间相干性<sup>[18-19]</sup>和良好的时间稳定性<sup>[20-21]</sup>等特性。正是由于光纤随机激光这些独特的优势,其已经在光纤传感、成像等领域得到应用,特别是在长距离分布式放大<sup>[22-23]</sup>和远距离点式传感<sup>[24-28]</sup>方面应用优势更加明显。

光纤随机激光点式传感系统不仅具有传统光纤点式传感系统的简单结构、抗电磁干扰、抗高压、高灵敏度的特点,还具有传感响应时间短、传感器可复用、精度不受光源波长漂移或链路温度变化影响等优势,从而适用于高压架空输电线路状态检测等工业应用并有望为智能电网等领域提供新型监测技术手段。此外,高阶光纤随机激光的功率分布向光纤尾端延伸,可提高尾端传感信号的信噪比,实现超长距离单点传感(> 100 km)。但是目前基于光纤随机激光的超长距离多点传感还缺少深入的探索,特别是缺少可精确描述高阶光纤随机激光长距离传感系统光谱特征的仿真模型。已有的功率稳态模型虽然可以描述激光阈值<sup>[4]</sup>、输出功率值、沿光纤强度分布<sup>[29]</sup>等,但是该模型只能表征光纤随机激光器的总功率,不能观察到斯托克斯光的频谱分量。优化后的功率稳态模型<sup>[30]</sup>能够定性描述随机光纤激光器的产生光谱,计算量较小,但是该方程也仅在一阶全开腔随机激光模型中得到了验证。非线性薛定谔方

程(NLSE)模型<sup>[31]</sup>也被用来描述光谱以及强度动态波动特征,但是该模型比较复杂,需要大量的计算资源<sup>[32]</sup>。

首先,本文对光纤随机激光的功率稳态模型进行了改进,所得到的仿真模型能够准确描述高阶光纤随机激光的频谱特性。对比并分析了改进后的模型在二阶全开腔和二阶半开腔两种随机激光器结构下的仿真结果和实验结果,验证了该模型能够用于设计高阶随机激光的长距离点式传感系统;然后,利用该模型仿真了基于二阶光纤随机激光的传感系统在 125、150、175、200 km 传感距离下的信噪比表现;最后,基于仿真结果,实验展示了 150 km 超长距离多点传感系统,其中信噪比最低的传感光纤光栅(FBG)的波长与应变的线性拟合度也达到了 0.999。该模型能够快速、准确地计算不同传感距离下,基于高阶随机激光的长距离点式传感系统的光谱信号特征,进而为此类传感系统的设计提供了可靠的平台。

## 2 基本原理

### 2.1 理论分析与建模

对于光纤随机激光器,常用功率稳态模型描述泵浦激光和随机激光之间的关系

$$\frac{dP_0^\pm}{dz} = \mp \alpha_0 P_0^\pm \mp g_1 \frac{f_0}{f_1} P_0^\pm (P_1^+ + P_1^- + \Gamma_1) \pm \epsilon_0 P_0^\mp, \quad (1)$$

$$\frac{dP_1^\pm}{dz} = \mp \alpha_1 P_1^\pm \pm g_1 (P_1^\pm + 0.5\Gamma_1)(P_0^+ + P_0^-) \mp g_2 \frac{f_1}{f_2} P_1^\pm (P_2^+ + P_2^- + \Gamma_2) \pm \epsilon_1 P_1^\mp, \quad (2)$$

$$\frac{dP_2^\pm}{dz} = \mp \alpha_2 P_2^\pm \pm g_2 (P_2^\pm + 0.5\Gamma_2)(P_1^+ + P_1^-) \pm \epsilon_2 P_2^\mp, \quad (3)$$

$$\Gamma_i = 4hf_i \Delta f_i \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(f_{i-1} - f_i)/K_B T] - 1} \right\}, i = 1, 2, \quad (4)$$

式中:下标 0、1、2 分别表示泵浦、第一阶和第二阶斯托克斯光波;上标+、-表示相对于泵浦波传播方向的正向和反向; $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  表示光功率; $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $g_1$ 、 $g_2$  和  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  分别是损耗,拉曼增益系数和瑞利散射系数; $f_0$ 、 $f_1$ 、 $f_2$  表示光波频率; $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$  表示光子数; $\Delta f_1$ 、 $\Delta f_2$  表示拉曼增益谱宽; $T$  表示绝对

温度; $K_B$  表示玻尔兹曼常数; $h$  表示普朗克常量。

为了使得仿真模型中含有光谱特性,根据泵浦光和斯托克斯光之间的关系,假设在拉曼增益曲线内,泵浦光激发出一系列不同频率的斯托克斯波数,修改后的方程如下

$$\frac{dP_0^\pm}{dz} = \mp \alpha_0 P_0^\pm \mp g_1 \frac{f_0}{f_1} P_0^\pm (P_1^+ + P_1^- + \Gamma_1) \pm \epsilon_0 P_0^\mp, \quad (5)$$

$$\frac{dP_1^\pm}{dz} = \mp \alpha_1 P_1^\pm \pm g_1 (P_1^\pm + 0.5\Gamma_1)(P_0^+ + P_0^-) \mp \sum_{i=1}^n \frac{f_1}{f_{2\lambda_i}} P_1^\pm (g_{2\lambda_i} (P_{2\lambda_i}^+ + P_{2\lambda_i}^-) d\lambda_i + \Gamma_{2\lambda_i}) \pm \epsilon_1 P_1^\mp, i = 1, \dots, n, \quad (6)$$

$$\frac{dP_{2\lambda_i}^{\pm}}{dz} = \mp \alpha_{2\lambda_i} P_{2\lambda_i}^{\pm} \pm g_{2\lambda_i} (P_{2\lambda_i}^{\pm} + 0.5\Gamma_{2\lambda_i})(P_1^+ + P_1^-) \pm \epsilon_{2\lambda_i} P_{2\lambda_i}^{\mp}, i = 1, \dots, n, \quad (7)$$

$$\Gamma_1 = 4hf_1\Delta f_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(f_0 - f_1)/K_B T] - 1} \right\}, \quad (8)$$

$$\Gamma_{2\lambda_i} = 4hf_{2\lambda_i}\Delta f_{2\lambda_i} \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(f_1 - f_{2\lambda_i})/K_B T] - 1} \right\}, i = 1, \dots, n, \quad (9)$$

式中,  $P_{2\lambda_i}^{\pm}$ 、 $g_{2\lambda_i}$ 、 $\alpha_{2\lambda_i}$ 、 $\epsilon_{2\lambda_i}$  不再是固定值, 而是和波长相关的参数。

在修改后的二阶功率稳态方程中, 利用  $\sum_{i=1}^n P_{2\lambda_i} d\lambda$  代替(2)式中二阶总功率  $P_2$ , 通过分别求解(7)式可以获得二阶不同波长的功率密度  $P_{2\lambda_i}^{\pm}$ 。上述对(5)式~(7)式求解的边界条件为

$$P_0^+(0) = P_{in}, \quad (10)$$

$$P_1^+(0) = R_1 P_1^-(0), \quad (11)$$

$$P_{2\lambda_i}^-(L) = R_{2\lambda_i} P_{2\lambda_i}^+(L), \quad (12)$$

式中,  $P_{in}$  表示泵浦端输入功率,  $L$  表示光纤长度,  $R_1$  表示一阶单端 FBG 反馈镜反射率,  $R_{2\lambda_i}$  表示光纤远端包含传感 FBG 对应的二阶斯托克斯光各波长的反射率。

通过(10)式~(12)式的边界条件约束, 可以使用弛豫迭代法对(5)式~(7)式进行数值求解, 设置模型中泵浦功率  $P_{in}$ 、超松弛因子  $W$ 、最大迭代次数  $N$ 、迭代误差  $\delta$  的思路如图 1 所示。

具体步骤:

1) 将泵浦端输入功率  $P_{in}$  代入光纤边界条件  $P^+(0)$  中;

2) 将  $P^+(z)$ 、 $P^-(z)$  代入(5)式~(7)式, 沿光纤长度进行积分处理, 得到最新的光纤功率分布  $P^{+'}(z)$ 、 $P^{-'}(z)$ ;

3) 在迭代次数小于最大迭代次数  $N$ , 迭代误差大于  $\delta$  时, 将刚得到的功率分布  $P^{+'}(z)$ 、 $P^{-'}(z)$  和初始功率分布  $P^+(z)$ 、 $P^-(z)$  进行加权求和, 重新赋值给  $P^+(z)$ 、 $P^-(z)$ , 其中加权系数即为超松弛因子  $W$ ;

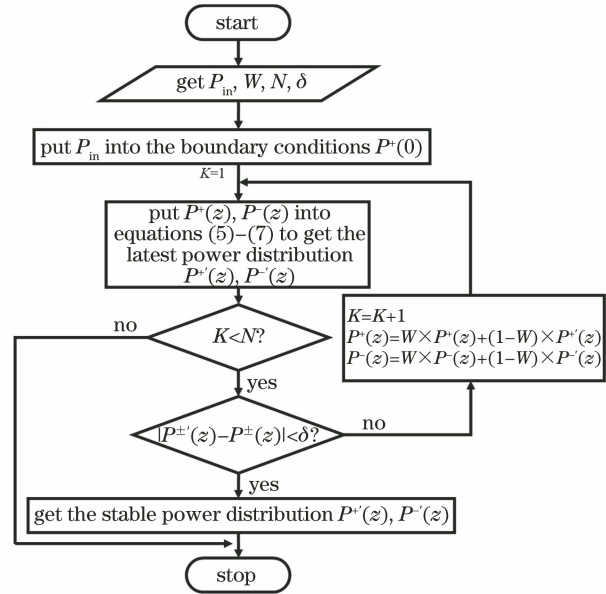


图 1 方程求解流程图

Fig. 1 Flow chart of equation solution

4) 重复步骤 2) 和 3), 在不超过最大迭代次数  $N$  时, 直到相邻两次的计算结果小于误差  $\delta$ , 便输出功率分布  $P^{+'}(z)$ 、 $P^{-'}(z)$  并结束计算。

## 2.2 模型验证

为了探究改进后模型能否应用于高阶光纤随机激光系统中, 通过二阶全开腔、二阶半开腔两组不同的光纤随机激光装置, 对仿真结果和实验结果进行对比分析, 验证提出的仿真模型的准确性。仿真模型中  $f_0$ 、 $f_1$  对应的泵浦波长  $\lambda_0$ 、一阶斯托克斯光波长  $\lambda_1$  分别为 1365 nm 和 1461 nm, 使用的光纤参数如表 1 所示, 二阶斯托克斯光的拉曼增益系数、损耗系数、瑞利散射系数分别如图 2(a)~图 2(c) 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Parameters for simulation

| Fiber parameter   | Value                                | Fiber parameter                              | Value                  |
|---|--------------------------------------|--|------------------------|
| $\lambda_0, \lambda_1 / \text{nm}$                      | 1365, 1461                           | $g_1 / (\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$ | 0.53                   |
| $\alpha_0, \alpha_1 / (\text{dB} \cdot \text{km}^{-1})$ | 0.31, 0.24                           | $h / (\text{J} \cdot \text{s})$              | $6.6 \times 10^{-34}$  |
| $\epsilon_0, \epsilon_1 / \text{km}^{-1}$               | $1 \times 10^{-4}, 6 \times 10^{-5}$ | $T / \text{K}$                               | 298                    |
| $\Delta f_1, \Delta f_2 / \text{THz}$                   | 0.18, 0.25                           | $K_B / (\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$       | $1.38 \times 10^{-23}$ |

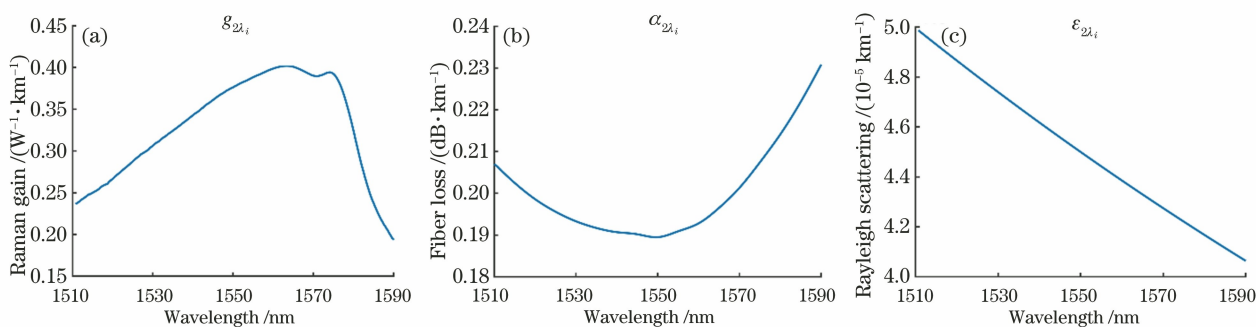


图 2 仿真参数。(a)拉曼增益系数;(b)损耗系数;(c)瑞利散射系数

Fig. 2 Simulation parameters. (a) Raman gain coefficient; (b) loss coefficient; (c) Rayleigh scattering coefficient

第一组验证实验的 100 km 标准单模光纤 (SMF)尾端不连接传感 FBG,形成一阶半开腔、二阶全开腔光纤随机激光结构,系统结构示意图如图 3 所示。图 3 中,将中心波长为 1365 nm 的拉曼激光器作为泵浦源,通过 1366/1455/1555 nm 波分复用器 (WDM) 的 1366 端口注入标准单模光纤中。将中心波长为 1461 nm、反射率为 90% 的 FBG 放置

在光纤前端作为一阶反馈镜,形成一阶随机激光前向泵浦半开腔结构。二阶随机激光经 WDM 的 1555 端口进入光谱分析仪器 (OSA),进而实现光谱的记录。泵浦功率从 1.6 W 开始,以 0.2 W 为间隔,增加到 2.8 W,仿真 1540~1580 nm 范围内的二阶光纤随机激光光谱,不同泵浦功率下仿真结果如图 4(a) 所示,图 3 结构中的实验结果如图 4(b) 所示。

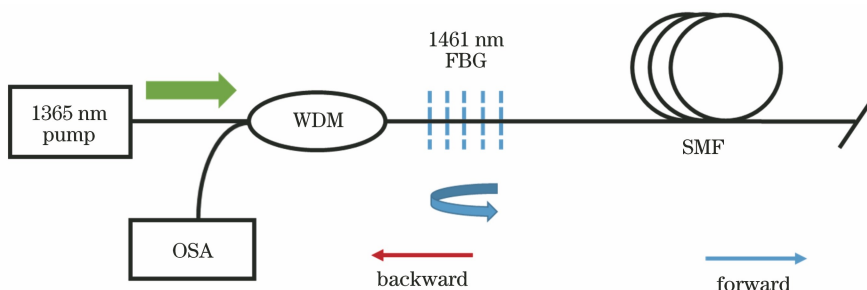


图 3 二阶光纤随机激光器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of second-order random fiber laser

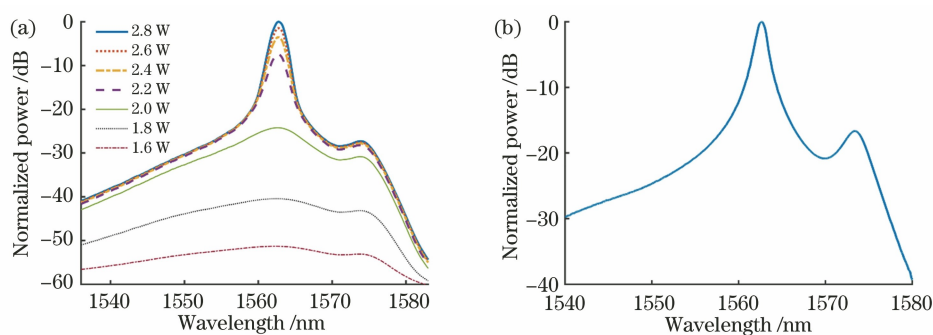


图 4 二阶全开腔光纤随机激光光谱。(a)不同泵浦功率下的仿真结果;(b)实验结果

Fig. 4 Spectra of second-order full-open-cavity random fiber laser. (a) Simulated results with different pump powers; (b) experimental result

从图 4(a)可知,当泵浦功率在 1.6~2.0 W 之间时,随着泵浦功率的增加,放大的自发辐射 (ASE) 光功率逐渐增大,但是没有产生随机激光。当泵浦功率增加到 2.2 W,达到二阶光纤随机激光激光阈值时,ASE 的光谱迅速变窄,总体功率迅速增大,产

生随机激光,激光的随机激光峰值在 1563 nm 附近。当继续增加泵浦功率时,随机激光的峰值功率增长趋势变缓。仿真结果在 1540~1580 nm 区间内光谱随泵浦功率变化的过程与随机激光理论产生过程相符<sup>[30]</sup>。图 4(b)为二阶全开腔光纤随机激光

的实验结果,与图 4(a)中激射后光纤随机激光的光谱形状高度相似。

第二组验证实验是在第一组装置的光纤尾端连续放置 3 个 FBG,形成一阶半开腔、二阶半开腔的光纤随机激光结构。其中传感 FBG 的中心波长分别为 1558.51、1563.17、1565.29 nm,反射率分为 85%、85%、92%,3 dB 带宽分别为 0.24、0.24、0.25 nm。系统的实验装置如图 5 所示。

归一化后的仿真结果和实验结果如图 6(a)和图 6(b)所示。图 6(a)为二阶半开腔光纤随机激光系统的仿真结果,可以看出中心波长为 1563.17 nm

的传感 FBG 对应的功率最高,因为二阶斯托克斯光的拉曼增益系数峰值位于 1563 nm 波长附近,所以该处传感信号的信噪比最高。虽然中心波长为 1565.29 nm 的传感 FBG 反射率更高,但是该波长距离拉曼增益系数峰值波长稍远,所以激射功率比中心波长为 1563.17 nm 的传感 FBG 低。中心波长为 1558.51 nm 的传感 FBG 的波长距离拉曼增益系数峰值波长最远,因此信噪比最低。图 6(b)为光纤前端观测到的系统实验结果,和图 6(a)中的仿真光谱趋势相吻合,进一步验证了该模型的光谱仿真的准确性。

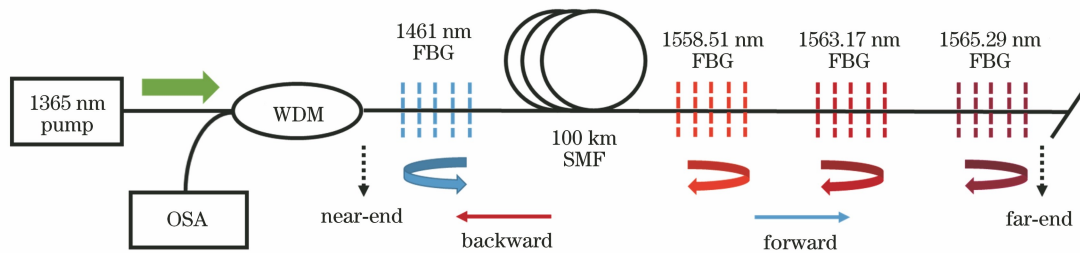


图 5 二阶半开腔光纤随机激光系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of second-order half-open-cavity random fiber laser system

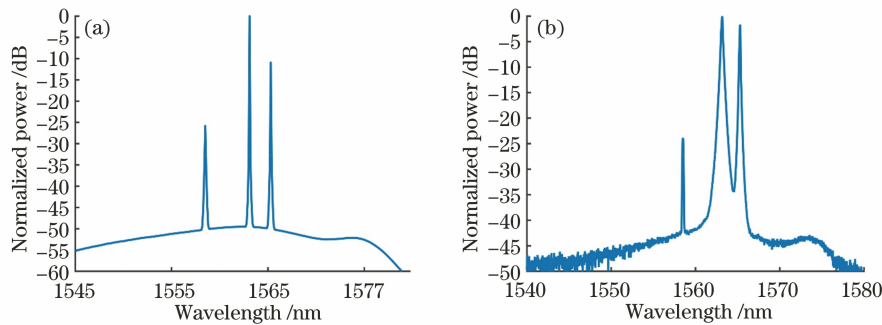


图 6 2 W 泵浦功率下,二阶半开腔光纤随机激光系统结果。(a)仿真结果;(b)实验结果

Fig. 6 Results of second-order half-open-cavity random fiber laser system under 2 W pump power.

(a) Simulation result; (b) experimental result

### 3 超长距离多点传感系统

为了探究这种二阶半开腔光纤随机激光系统的极限传感距离,按照图 7 所示的装置结构,分别仿真

了在 125、150、175、200 km 光纤长度下,系统的信噪比情况,其中远端使用的 FBG 中心波长分别是 1562.03、1563.02、1564.04、1564.99 nm,3 dB 带宽分别为 0.19、0.19、0.18、0.19 nm,反射率均为 90%,仿真结

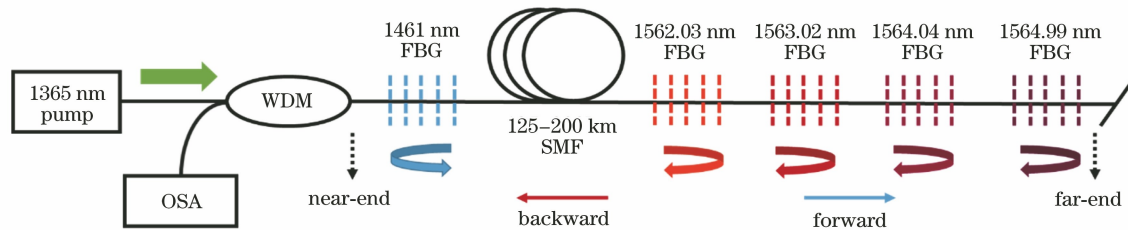


图 7 长距离多点传感系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of long-distance multi-point sensing system

果分别如图 8(a)、图 8(b)、图 8(c)和图 8(d)所示。

从不同传感距离的仿真结果可以发现,随着光纤长度的增加,传感 FBG 的信噪比逐渐降低。图 8(a)传感距离最短,所以图 8(a)中每个传感 FBG 的信噪比都比图 8(b)、图 8(c)和图 8(d)中相同波长

的传感 FBG 信噪比高。在传感距离为 150 km 时,传感信号仍有较高的信噪比;当传感距离达到 175 km,传感 FBG 的最大信噪比已经不足 2 dB;当传感距离达到 200 km 时,接收端光谱已无法分辨传感 FBG 的信号。

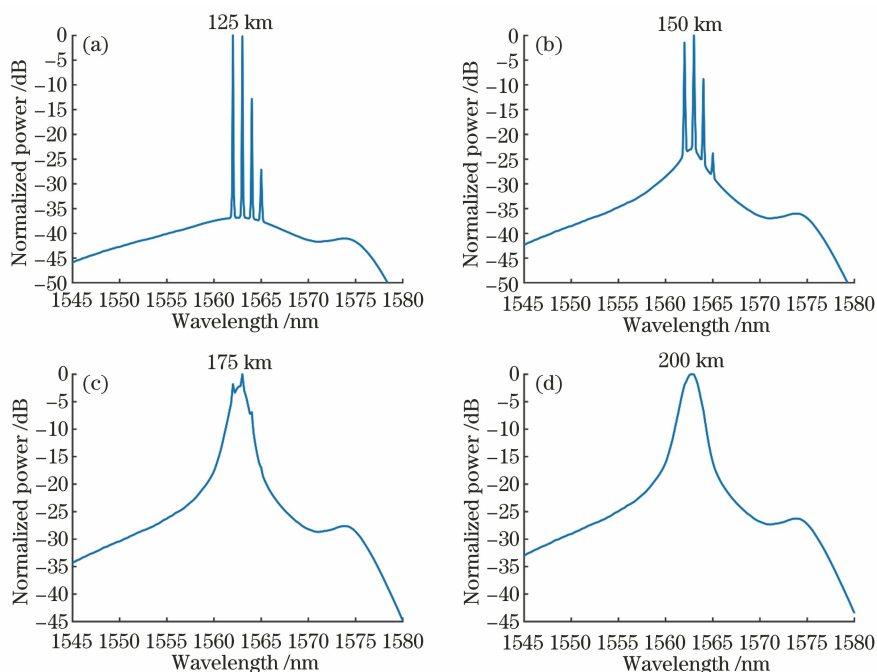


图 8 2.3 W 泵浦功率下,不同光纤长度的仿真结果。(a) 125 km SMF;(b) 150 km SMF;(c) 175 km SMF;(d) 200 km SMF  
Fig. 8 Simulation results of different fiber lengths under 2.3 W pump power. (a) 125 km SMF; (b) 150 km SMF; (c) 175 km SMF; (d) 200 km SMF

当传感距离为 150 km 时,从仿真图 8(b)可知,虽然中心波长 1564.99 nm 处的传感信噪比最低,但是信噪比也接近 5 dB,可以应用于长距离传感,为此设计了基于二阶半开腔光纤随机激光的 150 km 超长距离点式传感系统,近端探测到的光谱实验结果如图 9 所示。

心波长为 1563.02 nm 的传感 FBG 信噪比最高,因为其波长最靠近拉曼增益系数峰值波长,所以可得到最高的传感信噪比。中心波长为 1564.99 nm 的传感 FBG 由于其波长距离拉曼增益系数峰值波长最远,所以信噪比最低。

为验证该系统的传感能力,将该系统中信噪比最低的 1564.99 nm 传感 FBG 固定在位移台上,对传感 FBG 施加拉力使其发生形变,得到的中心波长与应变变化曲线如图 10 所示。

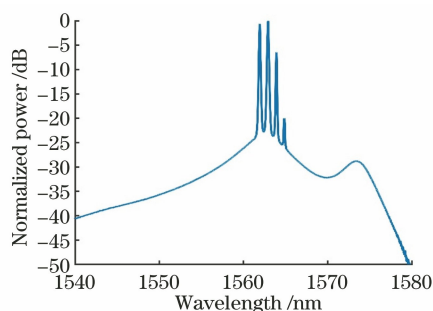


图 9 150 km 传感系统实验结果

Fig. 9 Experimental result of 150 km sensing system

图 9 的实验结果和图 8(b)仿真的光谱高度吻合,再次验证了仿真模型的准确性。同时从图 9 的实验结果中可以发现,在 150 km 的传感系统中,中

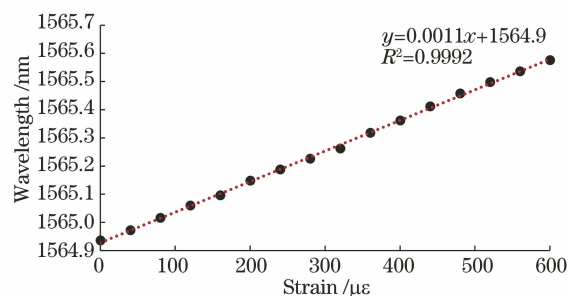


图 10 中心波长与微应变变化曲线

Fig. 10 Center wavelength versus micro strain curve

从图10可以看出,传感FBG中心波长变化与微应变呈线性关系,其线性拟合度已经达到了0.999,说明该系统完全可以应用于150 km超长距离多点传感。

## 4 结 论

对传统的高阶光纤随机激光功率稳态方程进行了改进,所得到的模型能够准确描述高阶光纤随机激光系统的光谱特性。同时以该模型为基础,设计并实现了基于二阶随机激光的150 km超长距离多点传感系统,传感信号的线性拟合度高达0.999,证明了本系统的传感能力。综上所述,该模型能够准确计算超长距离光纤随机激光多点传感系统在不同传感距离下的光谱特征,为此类传感系统的设计提供了一种高效、可靠的方法。

### 参 考 文 献

- [1] Lai W C, Ma P F, Liu W, et al. 550-W single-frequency all-fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0415001.  
来文昌, 马鹏飞, 刘伟, 等. 全光纤单频光纤放大器实现550W近衍射极限输出[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0415001.
- [2] Pan W W, Zhou J Q, Zhang L, et al. Research advances in ultrafast Raman fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508016.  
潘伟巍, 周佳琦, 张磊, 等. 超快拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508016.
- [3] Tan T, Yuan Z Y, Chen Y F, et al. Graphene-based fiber functional sensors and laser devices[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170613.  
谭腾, 袁中野, 陈远富, 等. 基于石墨烯的光纤功能化传感器件和激光器件[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170613.
- [4] Turitsyn S K, Babin S A, Churkin D V, et al. Random distributed feedback fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2010, 4(4): 231-235.
- [5] Zhang L, Jiang H W, Yang X Z, et al. Ultra-wide wavelength tuning of a cascaded Raman random fiber laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(2): 215-218.
- [6] Dong J Y, Zhang L, Jiang H W, et al. High order cascaded Raman random fiber laser with high spectral purity[J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5275-5280.
- [7] Han B, Rao Y J, Wu H, et al. Low-noise high-order Raman fiber laser pumped by random lasing [J]. Optics Letters, 2020, 45(20): 5804-5807.
- [8] Zhang L, Jiang H W, Yang X Z, et al. Nearly-octave wavelength tuning of a continuous wave fiber laser [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42611.
- [9] Yin G L, Saxena B, Bao X Y. Tunable Er-doped fiber ring laser with single longitudinal mode operation based on Rayleigh backscattering in single mode fiber [J]. Optics Express, 2011, 19(27): 25981-25989.
- [10] Demiguel-Soto V, Bravo M, Lopez-Amo M. Fully switchable multiwavelength fiber laser assisted by a random mirror [J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2020-2023.
- [11] Xu Y P, Zhang L, Chen L, et al. Single-mode SOA-based 1 kHz-linewidth dual-wavelength random fiber laser [J]. Optics Express, 2017, 25(14): 15828-15837.
- [12] Pang M, Bao X Y, Chen L, et al. Frequency stabilized coherent Brillouin random fiber laser: theory and experiments [J]. Optics Express, 2013, 21(22): 27155-27168.
- [13] Wang Z N, Wu H, Fan M Q, et al. High power random fiber laser with short cavity length: theoretical and experimental investigations [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(1): 10-15.
- [14] Xu J M, Huang L, Jiang M, et al. Near-diffraction-limited linearly polarized narrow-linewidth random fiber laser with record kilowatt output [J]. Photonics Research, 2017, 5(4): 350-354.
- [15] Xu J M, Huang L, Ye J, et al. Power scalability of a linearly-polarized narrowband random fiber laser in an all-fiber MOPA structure with 0.1 nm linewidth [J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(9): 095101.
- [16] Balaswamy V, Ramachandran S, Supradeepa V R. High-power, cascaded random Raman fiber laser with near complete conversion over wide wavelength and power tuning [J]. Optics Express, 2019, 27(7): 9725-9732.
- [17] Zhang L, Dong J Y, Feng Y. High-power and high-order random Raman fiber lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1-6.
- [18] Ma R, Wang Z, Zhang H H, et al. Imaging through opacity using a near-infrared low-spatial-coherence fiber light source [J]. Optics Letters, 2020, 45(13): 3816-3819.
- [19] Ma R, Li J Q, Guo J Y, et al. High-power low spatial coherence random fiber laser [J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8738-8744.
- [20] Song J X, Wu H S, Ye J, et al. High power linearly polarized Raman fiber laser with stable temporal

- output[J]. *Photonic Sensors*, 2019, 9(1): 43-48.
- [21] Xu J M, Ye J, Xiao H, et al. In-band pumping avenue based high power superfluorescent fiber source with record power and near-diffraction-limited beam quality [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e46.
- [22] Jia X H, Rao Y J, Peng F, et al. Random-lasing-based distributed fiber-optic amplification[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6572-6577.
- [23] Fu Y, Wang Z N, Zhu R C, et al. Ultra-long-distance hybrid BOTDA/ $\Phi$ -OTDR [J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 976.
- [24] Wang Z N, Rao Y J, Wu H, et al. Long-distance fiber-optic point-sensing systems based on random fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 17695-17700.
- [25] Fernandez-Vallejo M, Bravo M, Lopez-Amo M. Ultra-long laser systems for remote fiber Bragg gratings arrays interrogation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(14): 1362-1364.
- [26] Wang Z N, Sun W, Wu H, et al. Long-distance random fiber laser point sensing system incorporating active fiber [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22448-22453.
- [27] Pinto A M R, Lopez-Amo M, Kobelke J, et al. Temperature fiber laser sensor based on a hybrid cavity and a random mirror[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1168-1172.
- [28] Demiguel-Soto V, Leandro D, Lopez-Amo M. Ultra-long (290 km) remote interrogation sensor network based on a random distributed feedback fiber laser [J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27189-27200.
- [29] Churkin D V, El-Taher A E, Vatnik I D, et al. Experimental and theoretical study of longitudinal power distribution in a random DFB fiber laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11178-11188.
- [30] Vatnik I D, Churkin D V. Modeling of the spectrum in a random distributed feedback fiber laser within the power balance modes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9135: 91351Z.
- [31] Smirnov S V, Churkin D V. Modeling of spectral and statistical properties of a random distributed feedback fiber laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21236-21241.
- [32] Turitsyn S K, Babin S A, Churkin D V, et al. Random distributed feedback fibre lasers[J]. *Physics Reports*, 2014, 542(2): 133-193.