

## 激光与光电子学进展

## 基于超弱光纤光栅阵列的长距离传感系统

罗志会<sup>1,2</sup>, 向昊<sup>1,2</sup>, 徐冰<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>三峡大学湖北省弱磁探测工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002;<sup>2</sup>三峡大学理学院, 湖北 宜昌 443002

**摘要** 提出了一种基于超弱光纤光栅阵列的长距离传感系统。基于超弱光纤光栅的离散分布和高信噪比特点,采用分段采集的方法降低系统对数据缓存和计算能力的要求,利用 ZYNQ(ZYNQ-7035 All Programmable SoC)嵌入式底层硬件实现对选定空间上 10 km 传感段的解调。采用 OptiSystem 软件仿真分析系统的功率预算,精准设计入纤脉冲光功率以及拉曼光纤放大器的配置,结合电路的动态分段增益,实现长距离传感系统中的功率均衡,并搭建实验系统予以验证。结果表明:系统工作距离可以达到 50 km,传感信号的强度波动小于 2.2 dB,空间分辨率为 1.5 m,解调速度为 0.3 Hz,远端的解调精度稳定在 6 pm 以内,温度测量精度为  $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,应变测量精度为  $\pm 5.5\text{ }\mu\epsilon$ 。系统整体性能优于传统的分布式布里渊传感系统,且具有良好的可扩展性,在长距离光纤温度、应变传感上具有明显的技术优势。

**关键词** 光纤布拉格光栅; 长距离传感; 光纤传感系统; 拉曼光纤放大器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230952

## Long-Distance Sensing System Based on Ultra-Weak Fiber Bragg Grating Array

Luo Zhihui<sup>1,2</sup>, Xiang Hao<sup>1,2</sup>, Xu Bing<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Hubei Engineering Research Center of Weak Magnetic-Field Detection, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

<sup>2</sup>College of Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China

**Abstract** This paper proposes a long-distance sensing system using ultra-weak fiber Bragg grating arrays. By taking advantages of the discrete distribution and high signal-to-noise ratio of ultra-weak fiber Bragg gratings, this system employs a segmented acquisition method to decrease the requirements for data caching and computing capabilities. For spatial demodulation of the 10 km sensing section, ZYNQ (ZYNQ-7035 All Programmable SoC) embedded hardware is used. To design the input pulse power and Raman fiber amplifier configuration with power balance and dynamic segmented gain control, the OptiSystem software is employed to simulate and analyze the power budget of the system. An experimental system is constructed and validated, showing that the system's operating range can reach 50 km, the fluctuation of sensing signal intensity is less than 2.2 dB, the spatial resolution is 1.5 m, the demodulation speed is 0.3 Hz, the remote demodulation accuracy is within 6 pm, and the measurement accuracy for temperature and strain is  $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $\pm 5.5\text{ }\mu\epsilon$ , respectively. The overall system performance outperforms traditional Brillouin optical time-domain reflectometer and exhibits good scalability while demonstrating significant technical advantages in long-distance fiber temperature and strain sensing.

**Key words** fiber Bragg grating; long-distance sensing; optical fiber sensing system; Raman fiber amplifier

## 1 引言

超弱光纤布拉格光栅(Ultra-weak fiber Bragg grating, uwFBG)是对反射率低于 0.1% 光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)的统称,其继承了传

统 FBG 无源、波长解调、高精度等优势,单光纤可复用光栅的数量高达上万个<sup>[1]</sup>,已经被应用于土木工程、结构健康监测等领域<sup>[2-6]</sup>。uwFBG 具有超大容量、多参数、高信噪比等特点,其也成为长距离高压输电线路、海底电缆、输油管道等大型设施监测的研究热点。

收稿日期: 2023-03-27; 修回日期: 2023-04-27; 录用日期: 2023-05-08; 网络首发日期: 2023-05-18

通信作者: \*xbwhut2018@163.com

长距离光纤传感面临的主要挑战是系统性能劣化和信号衰减的问题。空间分辨率、测量精度、解调速度是衡量长距离光纤传感系统性能的主要指标。为了获取较高的测量精度和空间分辨率,传统长距离分布光纤传感技术,如分布式布里渊传感系统(Brillouin optical time-domain reflectometer, BOTDR),需要连续多次采集光纤上的信号,然后通过海量数据缓存和庞大算力进行去噪处理,这不仅增加系统解调硬件的复杂程度,还严重降低系统的解调速度。尽管 2022 年 Peng 等<sup>[7]</sup>提出一种基于双边带调制的 BOTDR 系统快速测量方法,避免时间的扫频和数据拟合处理,但测量 4.5 km 光纤的时间仍需 30 s。2019 年, Wang 等<sup>[8]</sup>采用 VBM3D 滤波方法对传感信号进行去噪处理来改善解调速度,但实验中 100.8 km 传感距离的测量时间仍超过 111 s。当 uwFBG 阵列向长距离拓展时,光栅数量和数据采集量会大幅提升,因此如何优化解调系统设计、抑制系统性能的退化显得至关重要。此外,长距离传输时产生的信号衰减也是超弱光纤光栅传感系统面临的挑战之一。在 FBG 传感系统中,饶云江等<sup>[9]</sup>利用掺铒光纤放大器(Erbium-doped fiber amplifier, EDFA)和拉曼光纤放大器(Raman fiber amplifier, RFA)相结合的放大方案实现了 300 km 的超长距离传感,系统在 275 km 处的信噪比仍大于 15 dB。2021 年,曹健华等<sup>[10]</sup>利用高阶随机激光的功率分布会向尾端延伸这一特性,结合 FBG 搭建了传感距离长达 150 km 的多点式光纤传感系统。但该系统中的 FBG 反射率高达 90%,信号强度高于 uwFBG 30 dB 以上,且 FBG 传感器的数量均不超过 10 个,信号串扰小。在 uwFBG 系统中直接引入上述的 EDFA+RFA 方案,很容易造成光纤前、后端信号的功率失衡,进一步劣化

末端信号的信噪比。2021 年,金燊等<sup>[11]</sup>提出通过双路采集前、后段信号来缓解功率失衡问题,但这种方案需要成倍增加硬件的配置,导致系统更加复杂。此外,同波长 uwFBG 的大规模复用时的阴影效应也不能忽略。2021 年, Gao 等<sup>[12]</sup>在 10 km 的光纤上复用 10000 个反射率为 0.01% 的 uwFBG 传感单元,尾端光栅的额外功率下降大于 8 dB,这进一步加剧了 uwFBG 传感系统的功率失衡。解决功率均衡问题也是拓展 uwFBG 传感距离的重要课题之一。

针对上述问题,本文提出一种基于 uwFBG 阵列的长距离传感系统。基于三峡大学团队开发的 uwFBG 解调模块,探索分段采集的方法,利用嵌入式底层硬件依次精准定位各指定传感段并逐段解调,实现长距离上的温度、应变感测。引入 OptiSystem 建立理论模型,仿真优化系统的功率,指导系统光路的精准配置,结合动态电信号增益,均衡长距离 uwFBG 信号功率。为长距离 uwFBG 感测提供一种高性价比的解决方案。

## 2 原理

### 2.1 传感系统

基于 uwFBG 阵列的长距离传感系统如图 1 所示。可调谐激光器(Tunable sweeping laser, TSL)在设定的波长范围内发出波长可变的连续光。连续光经半导体激光放大器(Semiconductor optical amplifier, SOA)调制成脉冲光,再由功率 EDFA 1 放大后耦合进入 uwFBG 阵列。考虑信号传输时的衰减,引入 RFA 对往返信号进行分布式放大。阵列中的反射信号经过前置 EDFA 2 放大后进入光电探测器(Photodetector, PD),完成光电转换和前置放大后再进入采集处理电路。信号的采集处理采用 ZYNQ7035 嵌入式系统单

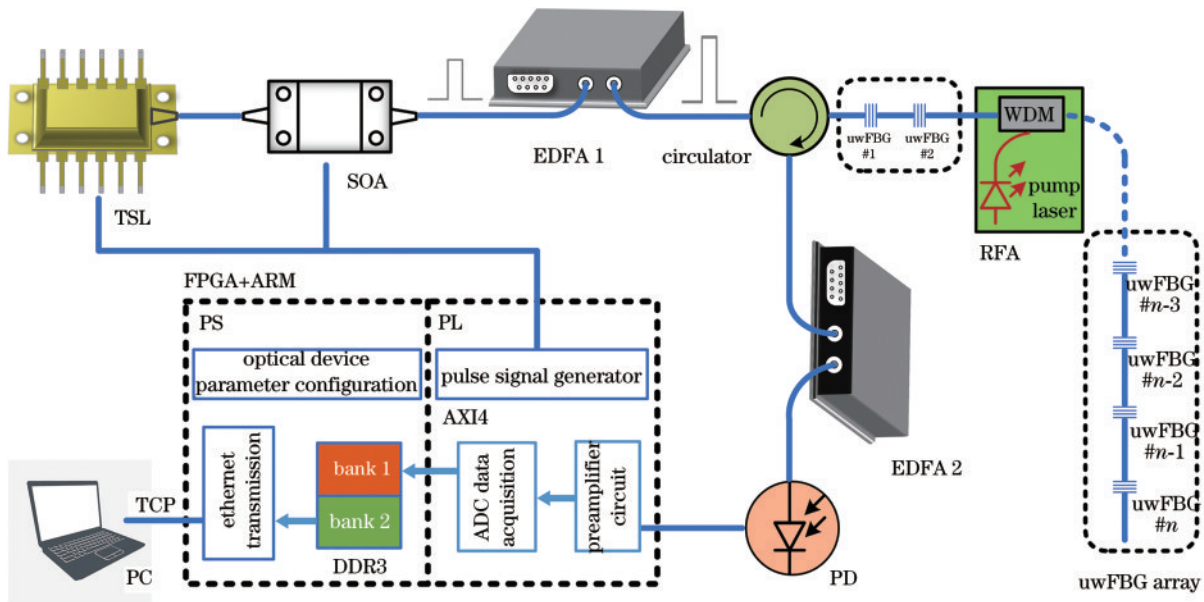


图 1 基于 uwFBG 阵列的长距离传感系统装置图

Fig. 1 Device diagram of long-distance sensing system based on uwFBG array

元,ZYNQ7035 采用 ARM(Advanced RISC machine)+FPGA(Field programmable gate array)架构,将系统的软件可编程性与 FPGA 的硬件可编程性进行整合,方便仪器仪表的模块化。其中 PL(Programmable logic)端 FPGA 利用其高效并行处理计算的优势,实现功能模块的并发执行和高速信号处理。PS(Processing system)端 ARM 则可以通过嵌入式软件开发,直接与上位机进行交互。在该传感系统中,ZYNQ7035 PL 端控制 SOA 脉冲调制,以及驱动模数转换器(Analog to digital converter, ADC)进行信息高速采集、数据矩阵转换和预处理,再通过 AXI4(Advanced extensible interface four)总线传输至 PS 端的 DDR3(Double-data-rate three)中进行缓存。PS 端主要完成光器件参数配置,并通过千兆以太网上传至计算机(PC)。PC 根据光纤上不同位置 uwFBG 反射光的时间延迟,对光栅阵列中各个 uwFBG 进行定位并分析。

### 2.2 分段采集

ZYNQ7035 系统单元完成一次 uwFBG 阵列的波长解调,需要接收 ADC 在一个波长扫描周期内采集的数据矩阵。假定 TSL 从起始波长扫描到截止波长的波长变化次数为  $N$ ,光纤长为  $L$ ,ADC 的采集频率为  $f$ ,单个采样点数据位宽为  $m$ ,则单个波长扫描周期内采集的总数据量  $D$  可表示为

$$D = \frac{2nLfNm}{c}, \quad (1)$$

式中: $n$ 为纤芯折射率,取值 1.5; $c$ 为真空中的光速( $3 \times 10^8$  m/s)。假设系统 ADC 采样频率为  $250 \times 10^6$  Sample/s,采样点数据位宽为 16 bit,单个扫描周期内 TSL 波长变化次数为 1250 次。当光纤长度为 50 km 时,ADC 在单个扫描周期内采集的数据矩阵达到 312.5 MB。由于在对大型数据矩阵进行预处理时,需要频繁存取,将占用大量的 FPGA 资源,严重影响系统的实时性。为了减少传感链路的数据量,采用 FPGA 精确控制信号采集的时延,对光纤上不同传感段的数据进行分时采集。例如,第一次在  $0 \sim 100 \mu\text{s}$  期间采集解调,第二次在  $100 \sim 200 \mu\text{s}$  期间采集解调,依次轮询,对应着每次采集 10 km 跨距段的长度,每段数据减少至 62.5 MB。同时,将 PS 端的 DDR3 划分出两个大小相等,存储空间为 100 MB 的 bank 区域,如图 2 所示。PL 端在向其中一个 bank 缓存数据时,PS 端读取另一个 bank 的数据进行处理。两个 bank 区域交换缓存和读取,进行乒乓操作,使数据流得到无缝缓冲和实时处理,无需排队等待处理。与传统整段采集方法相比,所提方法降低长距离采集对硬件配置的需求,提升解调速率达 50% 以上,且不受光纤采样长度和 DDR3 存储空间的影响,具有良好的可扩展性。

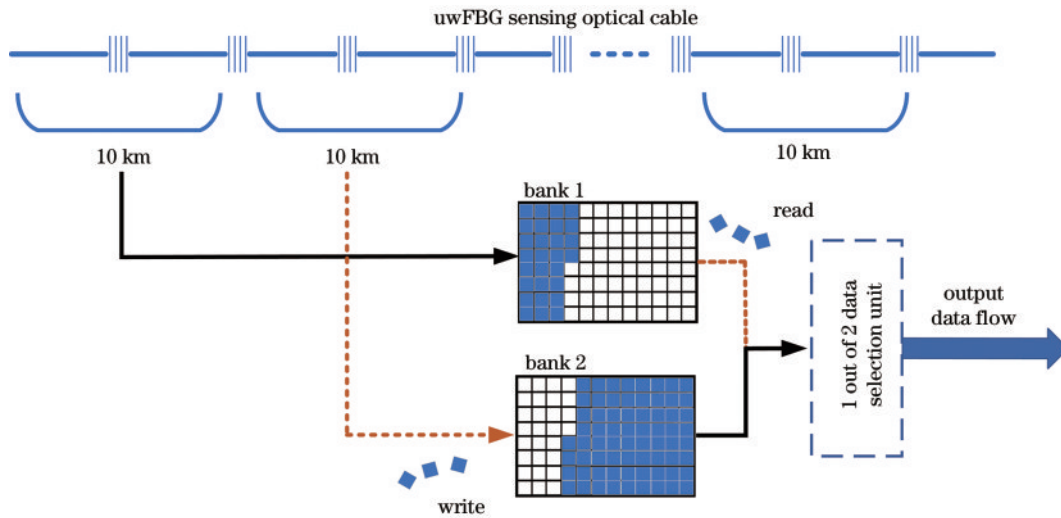


图 2 分段采集流程

Fig. 2 Segmented acquisition process

### 2.3 功率预算和仿真分析

长距离 uwFBG 系统中的光纤传输损耗和阴影效应会造成信号光的功率衰减,这使得首尾两端传感器反射信号的功率失衡。可以将 EDFA 和 RFA 联合放大以补偿功率衰减。假设光栅阵列中同波长 uwFBG 个数为  $x$ ,光纤长为  $L$ ,则光纤最末端 uwFBG 反射光到达 PD 时的光功率  $P$  可表示为

$$P = P_0 + 10 \left[ 2(x-1) \lg(1-r) + \lg r \right] - 2\alpha L + G_R + G_E, \quad (2)$$

式中: $P_0$ 为入纤的脉冲光功率; $r$ 为 uwFBG 反射率; $\alpha$ 为信号光的传输损耗系数; $G_R$ 、 $G_E$ 分别为 RFA 和前置 EDFA 2 提供的增益值。为了保证超弱光栅的反射信号的强度,同时避免产生非线性噪声,入纤脉冲(经过功率 EDFA 1 放大后的光脉冲)峰值功率  $P_0$  在 35~45 dBm。传输链路的功率损失主要由前置 EDFA 2 和 RFA 来均衡。其中,RFA 是基于光纤中的受激拉曼散射过程,将传输光纤作为增益介质<sup>[13]</sup>,实现对信号光的分布式放大。由于前向泵浦方案安装简单且泵浦

光与光栅反射光逆向传输,可以减弱泵浦光的相对强度噪声对光栅反射信号的影响,因此所提方法采用前向泵浦方式。RFA 作用下的信号光功率<sup>[14]</sup>可表示为

$$P_s(z) = \exp\left\{-g_{\text{eff}}P_R[\exp(-\alpha_p z) - 1]/\alpha_p - \alpha_s z\right\}, \quad (3)$$

式中: $P_s(z)$ 为信号光在光纤 $z$ 处的光功率; $P_R$ 为拉曼泵浦光功率; $\alpha_s$ 、 $\alpha_p$ 分别为信号光和泵浦光的传输损耗系数; $g_{\text{eff}}$ 为有效拉曼增益系数。由式(3)可知,信号光传输至光纤不同位置时的功率大小与拉曼泵浦光功率有关。

为了探索适用于 uwFBG 系统的最佳 EDFA+RFA 配置,采用 OptiSystem 建立 uwFBG 系统仿真模型。设置光纤长为 50 km,光栅阵列中 uwFBG 反射率

为 0.01%,间隔 2 m 分布,共 25000 个,光纤的传输损耗系数为 0.2 dB/km,仿真分析在不同拉曼泵浦光功率和不同入纤功率(固定泵浦光功率为 600 mW)条件下光纤上的信号功率分布,仿真结果如图 3(a)、图 3(b)所示。由图 3 可知,泵浦功率越大增益越强,信号入纤功率越大衰退越快,整段光纤中的功率呈现明显不均衡分布。这主要是瓦级入纤光功率经过 RFA 增益放大后,光纤中产生受激布里渊散射(Stimulated Brillouin scattering, SBS)效应<sup>[15-17]</sup>,这种非线性效应会限制系统的最高功率,加快信号光的功率衰减。此外,泵浦光在传输过程中,随着拉曼效应的吸收以及光纤损耗的增加,远端泵浦信号也明显减弱,信号在远端的拉曼增益也明显减小。

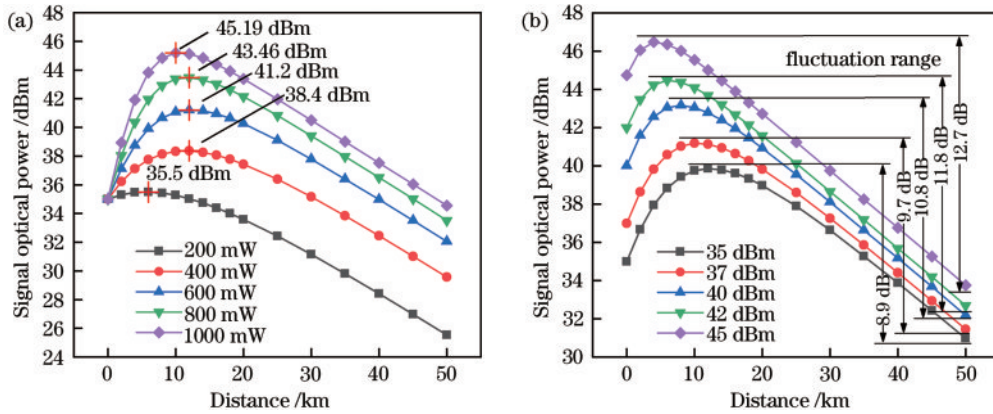


图 3 信号光在总长为 50 km 的光纤各处的功率分布。(a)入纤光功率为 35 dBm;(b)拉曼泵浦光功率为 600 mW  
Fig. 3 Power distribution of signal optical at various locations on a 50 km fiber optic cable. (a) Input optical power is 35 dBm; (b) Raman pump optical power is 600 mW

由图 3 还可知,RFA 的工作位置对系统的功率分布有显著的影响。根据式(2)计算得到阴影效应以及末端 uwFBG 反射引起的最大损耗为 61 dB,远端信号光往返传输损耗为 20 dB。假设前置 EDFA 2 提供 20~30 dB 的增益,为了获取 RFA 最优增益配置,仿真分析在不同入纤光功率下,RFA 处于不同位置工作时  $G_R$  的变化情况,结果如图 4(a)所示。RFA

工作位置从光纤前端向后移动时, $G_R$ 先增大后减少,当  $G_R$  处于最大值时,RFA 工作位置即为最佳配置点。当入纤光功率  $P_0$  在 35~45 dBm 范围时,RFA 最佳工作位置处于光纤 9.2~11.2 km 区间内。且当  $P_0=35$  dBm 时, $G_R$  最大值为 17.2 dB,50 km 远端信号的探测功率  $P$  为 -8.8 dBm,满足系统设计要求。同时,为了获得最佳的功率均衡效果,固定 RFA 的最佳

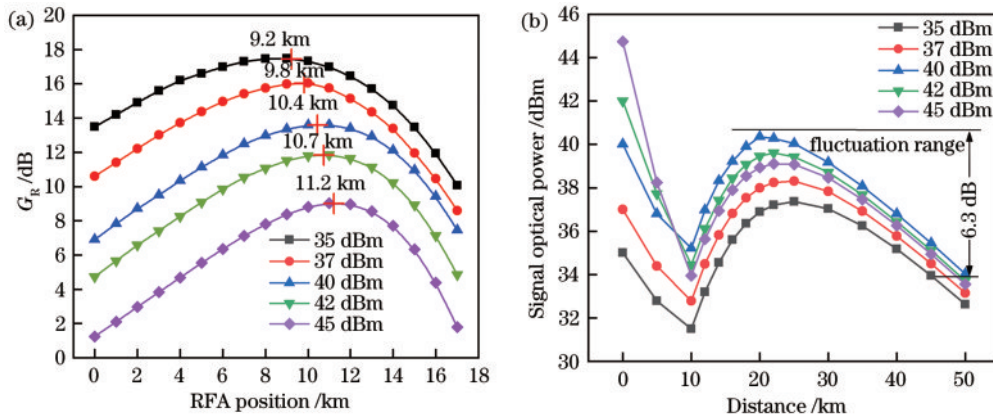


图 4 在不同的入纤光功率下 GR 的变化和信号光的功率分布。(a)GR 的变化情况;(b)信号光的功率分布  
Fig. 4 Changes in GR and distribution of signal optical power when the input optical power is different. (a) Changes in GR values; (b) distribution of signal optical power

工作位置,分析在不同入纤光功率下光纤上的功率分布,结果如图 4(b)所示。结果表明,当入纤光功率被设定在 40 dBm 时,远端信号的光功率最大,功率波动小于 6.3 dB。

### 3 系统性能测试

#### 3.1 实验平台搭建

50 km 的 uwFBG 传感系统如图 5 所示,包括 uwFBG 解调仪、传感光缆、RFA 和 PC。uwFBG 解调仪集成了 ZYNQ7035 嵌入式系统单元和 TSL、SOA、

功率 EDFA 1、前置 EDFA 2 以及 PD。TSL 在 1528~1568 nm 内步进扫描,经 SOA 调制以及功率 EDFA 1 放大后的脉冲峰值功率在 35~45 dBm 之间,脉冲宽度为 10 ns。RFA 泵浦光波长为 1455 nm,最大功率为 600 mW。传感光缆采用型号为 G. 652D 的单模光纤,光纤出厂已按 10 km 为一卷封装成缆,每卷光纤之间插入一段长 30 m 的 uwFBG 传感阵列。uwFBG 中心波长为 1553 nm,反射率为 0.01%,以 1.5 m 间隔分布。RFA 的仿真最佳工作位置处于光纤 9.2~11.2 km 内,将根据具体的实验要求进行调整。

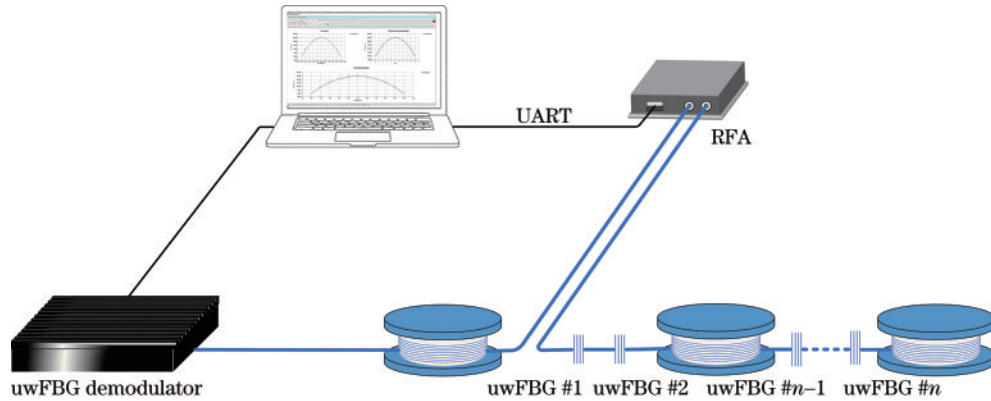


图 5 长距离传感系统实验平台

Fig. 5 Long-distance sensing system experimental platform

#### 3.2 实验测试

为了对比系统优化设计前后的效果,先将 RFA 配置于光纤前端 0 km 处,实测在不同入纤功率下不同位置的阵列反射信号强度,结果如图 6(a)所示。由图 6(a)可知,当 RFA 配置于 0 km 处时,随着入纤光功率的增大,uwFBG 阵列反射光强度也逐渐提高,该变量采用探测器输出电压来衡量。如图 7(a)所示,当入纤光功率增加到 43 dBm 时,光纤前端 10 km 处的 uwFBG 反射光强度已经接近饱和(系统最大量程为 3.3 V),但 40 km 处 uwFBG 最大反射光强度的探测器输出电压却不足 0.2 V,出现光纤前端信号饱和而后

端信号强度不足的情况,除了光纤损耗以外,非线性效应以及远端泵浦增益减弱加剧了功率不均衡的现象,实际的有效传感距离仅为 30 km;考虑光纤的单盘长度以及分割的难度,调整 RFA 到 10 km 处的工作位置(接近优化的位置值),实测在不同入纤功率下不同位置的阵列反射信号强度,结果如图 6(b)所示。由图 6(b)可知,随着入纤光功率的增大,RFA 后 40 km 的信号强度先增大后减小,在链路的 50 km 处反射信号强度的探测器输出电压达到 0.2 V 以上,且前端 uwFBG 反射光信号未饱和。如图 7(b)所示,当入纤光功率为 41.3 dBm 时,uwFBG 阵列反射光强度最大,

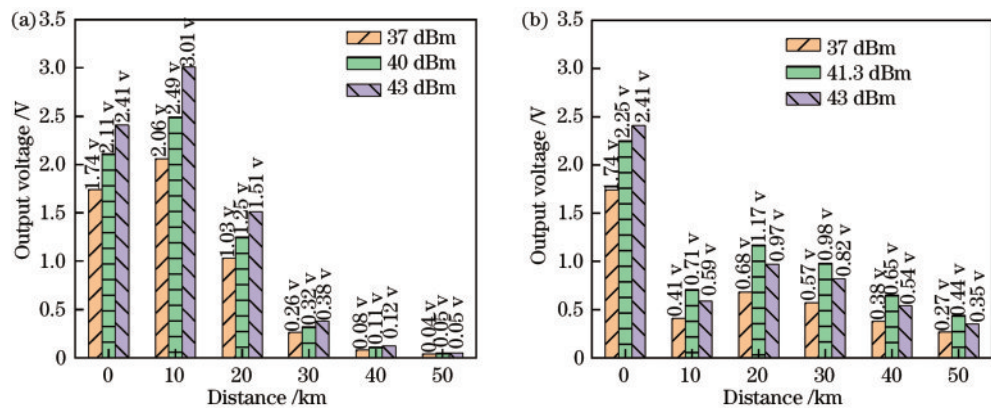


图 6 在不同入纤光功率下,各处 uwFBG 反射光强度对应的输出电压。(a)RFA 配置在 0 km 处;(b)RFA 配置在 10 km 处

Fig. 6 Reflected optical intensity of uwFBG in each place corresponds to the output voltage at different input optical powers. (a) RFA configuration at 0 km; (b) RFA configuration at 10 km

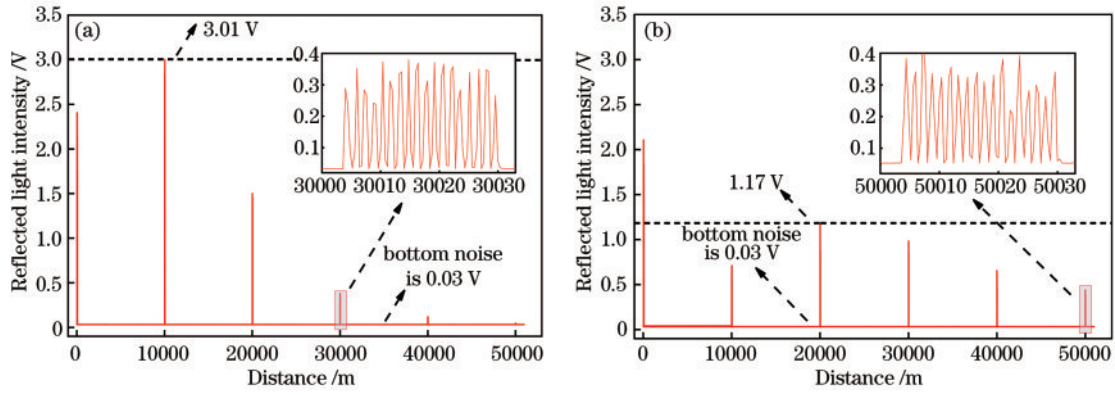


图 7 光纤各处 uwFBG 的反射光强度。(a) RFA 配置在 0 km 处, 43 dBm 的入纤光功率; (b) RFA 配置在 10 km 处, 41.3 dBm 的入纤光功率

Fig. 7 Reflected optical intensity of uwFBG everywhere in the optical fiber. (a) RFA configuration at 0 km, input optical power of 43 dBm; (b) RFA configuration at 10 km, input optical power of 41.3 dBm

系统的信号功率波动小于 6 dB, 探测效果与仿真结果基本吻合。

### 3.3 分段增益

由图 6、图 7 可知, 优化入纤功率和 RFA 的配置后系统的功率均衡有明显改善, 但远端信号依旧较弱。考虑到在分段采集时, 各传感段的信号可以在电域内进行单独增益, 这有望进一步均衡系统的功率。在解调模块的 ADC 采集电路中配置有可动态增益的前置放大器 AD8366, 增益范围为 4.50~20.25 dB。在系统分段采集信号的同时, 可通过 FPGA 精确控制 AD8366 的工作时序, 对不同区段的 uwFBG 反射信号进行不同程度的增益放大。例如, 对 0~10 km 区段内的 uwFBG 反射光强度进行默认的 4.5 dB 的增益放大, 10~30 km 区段内进行 13.5 dB 的增益放大, 30~50 km 区段内进行 18.5 dB 的增益放大。经过分段增益后的 uwFBG 阵列的反射光强度如图 8 所示, uwFBG 反射光强度的探测器输出电压均在 2.0 V 以上, 最末端 uwFBG 的信噪比能达到 35 dB, 整个系统的检测信号强度波动小于 2.2 dB。为了评估 50 km 传感系统的实测效果, 通过该系统对 0 km、50 km 处 uwFBG 中心波长进行解调, 结果如图 9 所示。系统在

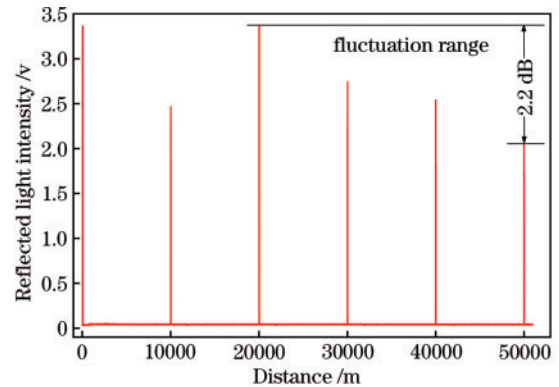


图 8 uwFBG 阵列分段增益后 50 km 内的反射光强度  
Fig. 8 Reflected optical intensity of uwFBG array within 50 km after segmented gain

光纤前端解调精度为  $\pm 0.2$  pm, 在 50 km 处仍能稳定在 6 pm 以内, 系统响应频率为 0.3 Hz, 测量时间少于传统 BOTDR, 传统 BOTDR 每千米测量时间为 20 s<sup>[18]</sup>, Peng 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于双边带调制的 BOTDR 快速测量方法, 4.5 km 光纤的测量时间仍需 30 s。

### 3.4 温度、应变响应测试

为了验证该系统能否完成长距离的温度、应变传感监测, 将 RFA 配置于 10 km 处, 入纤光功率调整为

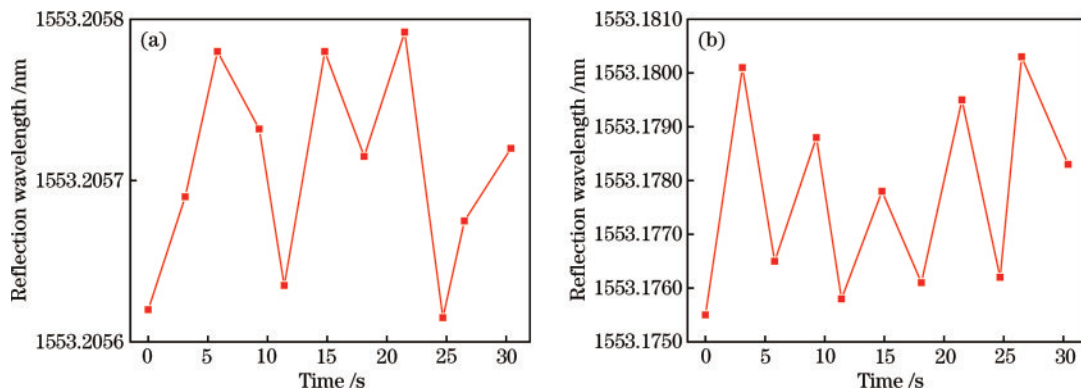


图 9 系统对光纤不同位置处 uwFBG 中心波长的解调效果。(a) 0 km; (b) 50 km

Fig. 9 Demodulation effect of the system on the center wavelength of uwFBG at different positions of the optical fiber. (a) 0 km; (b) 50 km

41.3 dBm, 对 50 km 处 uwFBG 进行温度、应变响应监测实验。已知 uwFBG 中心波长变化量与外界环境温度、应变变化呈线性相关<sup>[19]</sup>, 其关系可表示为

$$\Delta\lambda_B = K_T\Delta T + K_\epsilon\epsilon, \quad (4)$$

式中:  $\lambda_B$  为 uwFBG 中心波长;  $T$  为温度;  $\epsilon$  为应变;  $K_T$  为 uwFBG 温度灵敏度系数;  $K_\epsilon$  为 uwFBG 应变灵敏度系数。通过标定实验得到 uwFBG 中心波长与温度、应变变化的曲线分别如图 10(a)、图 10(b)所示, 两曲

线的线性拟合度均达到 0.999。这表明该系统所测得的 50 km 处 uwFBG 中心波长变化量与温度、应变变化具有良好的线性关系, 说明系统能够应用于 50 km 长距离的温度、应变测量。与裸光纤相比, 实验采用的紧包光纤 uwFBG 温度灵敏度系数略大 (39.2 pm/°C), 应变灵敏度系数为 1.1 pm/ $\mu\epsilon$ 。测试了系统在 50 km 处波长解调精度为  $\pm 6$  pm, 则系统相应温度测量精度为  $\pm 0.15$  °C, 应变测量精度为  $\pm 5.5$   $\mu\epsilon$ 。

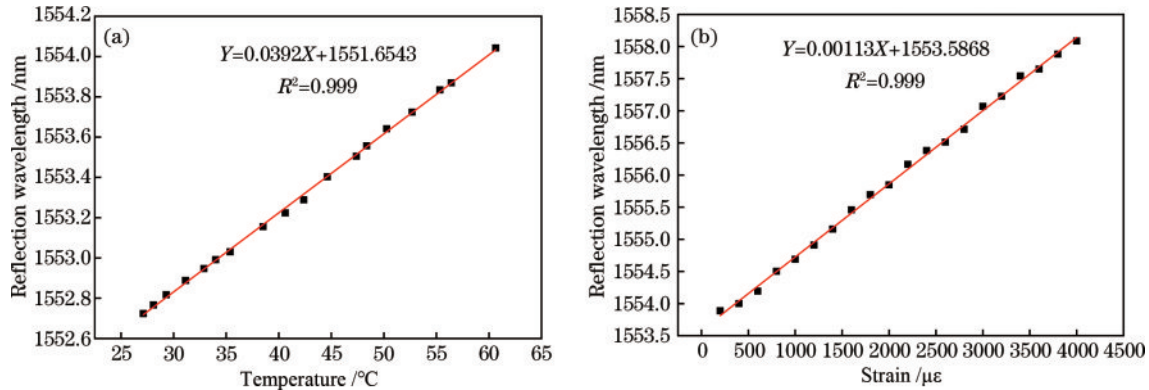


图 10 uwFBG 中心波长与各变量的关系。(a) 温度变化曲线; (b) 应变变化曲线

Fig. 10 Relation between uwFBG center wavelength and various variables. (a) Temperature variation curve; (b) strain variation curve

## 4 结 论

针对 uwFBG 高信噪比、离散分布的特点, 采用分段采集的方法, 仿真优化入纤功率和拉曼配置, 设计并验证了一种基于 uwFBG 的长距离传感系统。通过仿真分析, 在 50 km 传感距离中, RFA 最佳配置区间为 9.2~11.2 km, 相比于将 RFA 配置于光纤链路开端, 优化后的最佳配置能提高光纤链路末端光栅反射信号强度, 同时均衡光纤链路中的整体光栅的反射信号强度。实验结果表明: EDFA+RFA 的联合配置经过优化后, 能将系统有效探测距离从 30 km 提升至 50 km, 并在电域上利用分段增益进一步均衡信号强度, 整体信号强度波动小于 2.2 dB。系统解调频率为 0.3 Hz, 空间分辨率为 1.5 m, 远端解调精度稳定在 6 pm 以内, 综合性能优异, 所提方法在长距离光纤温度、应变感测等领域具有良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Guo H Y, Tang J G, Li X F, et al. On-line writing identical and weak fiber Bragg grating arrays[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3): 030602.
- [2] Pan J J, Hou W, Wang L Y, et al. High-precision continuous deformation monitoring method based on ultra-weak FBG array[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 73: 103068.
- [3] Han H M, Shi B, Zhang L, et al. Deep displacement monitoring and foundation base boundary reconstruction analysis of diaphragm wall based on ultra-weak FBG[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 17: 104158.
- [4] Liu S P, Shi B, Gu K, et al. Fiber-optic wireless sensor network using ultra-weak fiber Bragg gratings for vertical subsurface deformation monitoring[J]. Natural Hazards, 2021, 109(3): 2557-2573.
- [5] Li S, Jin L, Jiang J P, et al. Looseness identification of track fasteners based on ultra-weak FBG sensing technology and convolutional autoencoder network[J]. Sensors, 2022, 22(15): 5653.
- [6] Gan W B, Li S, Li Z Y, et al. Identification of ground intrusion in underground structures based on distributed structural vibration detected by ultra-weak FBG sensing technology[J]. Sensors, 2019, 19(9): 2160.
- [7] Peng J Q, Lu Y G, Zhang Y Y, et al. Distributed strain and temperature fast measurement in Brillouin optical time-domain reflectometry based on double-sideband modulation[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 1511-1520.
- [8] Wang B W, Wang L, Yu C Y, et al. Long-distance BOTDA sensing systems using video-BM3D denoising for both static and slowly varying environment[J]. Optics Express, 2019, 27(25): 36100-36113.
- [9] 饶云江, 封莎, 冉曾令, 等. 超长距离光纤布拉格光栅传感系统[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(5): 703-705, 736. Rao Y J, Feng S, Ran Z L, et al. Ultra-long distance fiber Bragg grating sensor system[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(5): 703-705, 736.
- [10] 曹健华, 林圣淘, 王子南, 等. 超长距离光纤随机激光多点传感系统的设计与实现[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306006. Cao J H, Lin S T, Wang Z N, et al. Design and implementation for ultra-long-distance multi-point sensing

- system based on random fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306006.
- [11] 金燊, 宋伟, 杨纯, 等. 120 km 长距离分布式光纤振动传感系统[J]. *光通信研究*, 2021, 47(3): 20-24.  
Jin S, Song W, Yang C, et al. 120 km long-distance distributed optical fiber vibration sensing system[J]. *Study on Optical Communications*, 2021, 47(3): 20-24.
- [12] Gao W J, Liu J X, Guo H Y, et al. Multi-wavelength ultra-weak fiber Bragg grating arrays for long-distance quasi-distributed sensing[J]. *Photonic Sensors*, 2022, 12(2): 185-195.
- [13] 龙青云, 胡素梅, 朱伟玲. 光纤拉曼放大器的最大拉曼增益特性[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0120006.  
Long Q Y, Hu S M, Zhu W L. Maximum Raman gain characteristics of fibre Raman amplifier[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0120006.
- [14] 彭正谱, 饶云江, 彭飞, 等. 基于外差检测和前向拉曼放大的新型长距离相敏光时域反射仪[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(4): 724-729.  
Peng Z P, Rao Y J, Peng F, et al. Long distance phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on heterodyne detection and forward Raman amplification[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2014, 25(4): 724-729.
- [15] 杨玉莲, 刘黎明, 邓庆雪, 等. 非线性效应对前向受激布里渊散射分布式传感的影响[J]. *物理学报*, 2022, 71(15): 154206.  
Yang Y L, Liu L M, Deng Q X, et al. Influence of nonlinear effect on distributed sensing of forward stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(15): 154206.
- [16] 李立, 饶云江, 谢康, 等. 单模光纤受激布里渊散射阈值的研究[J]. *光学与光电技术*, 2009, 7(1): 17-19, 32.  
Li L, Rao Y J, Xie K, et al. Study on stimulated Brillouin scattering threshold in optical fibers used for FTTH[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, 7(1): 17-19, 32.
- [17] 王振宝, 邵碧波, 张磊, 等. 光纤受激布里渊散射阈值分析与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 090603.  
Wang Z B, Shao B B, Zhang L, et al. Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 090603.
- [18] 张宇阳, 路元刚, 彭捷钦. 布里渊光时域光纤传感中的快速测量技术[J]. *半导体光电*, 2022, 43(4): 625-641.  
Zhang Y Y, Lu Y G, Peng J Q. Fast measurement technology in Brillouin optical time domain optical fiber sensing[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(4): 625-641.
- [19] 姜志刚. FBG 光纤光栅的原理和应用[J]. *中国水运*, 2008, 8(5): 128-129.  
Jiang Z G. Principle and application of FBG fiber grating [J]. *China Water Transport*, 2008, 8(5): 128-129.