

# 干涉型光纤海洋参数传感器的分布式测量方法研究

郑洪坤<sup>1,2</sup> 吕日清<sup>1</sup> 赵勇<sup>1,3,4</sup> 彭昀<sup>3,4</sup> 林子婷<sup>1</sup> 刘睿杰<sup>1</sup>

**摘要** 光纤传感器因其灵敏度高、体积小等优点在海洋监测领域得到了广泛关注。目前高性能的海洋温盐深参数监测光纤传感器大都基于干涉原理,难以实现同一系统内多个传感器的复用,不能满足海洋环境参数高时空分辨力的监测需求。基于调频连续波原理,提出一种适用于干涉型海洋参数光纤传感器的大容量复用方法。利用不同干涉仪端面反射光与参考光形成 Mach-Zehnder 干涉光谱的特征频率确定不同传感器的位置,通过不同端面特征频率间的拍频还原了单个传感器的光谱。设计并搭建了干涉型海洋参数传感器的分布式传感系统,实现了系统中传感器的定位以及光谱信号还原,并通过理论计算证明分布式传感系统中至少可以实现 500 个传感器的复用。本论文的研究可以为高性能干涉型光纤传感器的海洋参数链式监测提供技术支持。

**关键词** 光纤传感器, 传感器复用, 调频连续波技术, 法布里-珀罗干涉传感器, 海洋监测

**引用格式** 郑洪坤, 吕日清, 赵勇, 彭昀, 林子婷, 刘睿杰. 干涉型光纤海洋参数传感器的分布式测量方法研究. 自动化学报, 2023, 49(9): 1941-1950

**DOI** 10.16383/j.aas.c220682

## Research on the Distributed Measurement Method of Ocean Optical Fiber Sensor Based on Interferometer

ZHENG Hong-Kun<sup>1,2</sup> LV Ri-Qing<sup>1</sup> ZHAO Yong<sup>1,3,4</sup> PENG Yun<sup>3,4</sup> LIN Zi-Ting<sup>1</sup> LIU Rui-Jie<sup>1</sup>

**Abstract** Optical fiber sensor has attracted a lot of focus in the ocean observation domain for its high sensitivity and small volume. Currently, the high performance optical fiber sensor is mainly dominated by sensors based on the interference principle. It is hard to achieve the multiplexing with a large number of sensors, which cannot meet the monitoring requirement of high spatiotemporal resolution of ocean parameters. In this paper, a large capacity multiplexing technology based on frequency modulation continuous wave for interferometric optical fiber sensors is proposed. The Mach-Zehnder interferometer formed by the reference beam and reflected light is used to locate the position of the sensor, and the beat frequency between two reflective mirrors is employed to recover the spectrum of the sensor. The distributed sensing system for interferometric optical fiber sensors is designed and built, and the positioning and distinction spectral signals of sensors are realized. The theoretical calculation result indicates the multiplexing amount of sensors can reach 500 at least. The research work in this paper paves the way for the chain monitoring of ocean parameters based on high performance interferometric optical fiber sensors.

**Key words** Optical fiber sensors, sensor multiplexing, frequency modulated continuous wave (FMCW) technology, Fabry-Perot interferometer sensors (FPI), ocean monitoring

**Citation** Zheng Hong-Kun, Lv Ri-Qing, Zhao Yong, Peng Yun, Lin Zi-Ting, Liu Rui-Jie. Research on the distributed measurement method of ocean optical fiber sensor based on interferometer. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(9): 1941-1950

收稿日期 2022-08-30 录用日期 2022-12-01

Manuscript received August 30, 2022; accepted December 1, 2022

国家自然科学基金(61933004, U22A2021), 河北省自然科学基金创新研究群体(F2020501040), 中央高校基本科研业务费(N2304003)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61933004), National Natural Science Foundation of China (U22A2021), Natural Science Foundation of Hebei Province Innovative Research Group Project (F2020501040), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (N2304003)

本文责任编辑 董峰

Recommended by Associate Editor DONG Feng

1. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819 2. 之江实验室光纤传感研究中心 杭州 311121 3. 东北大学秦皇岛分校控制工程学院 秦皇岛 066004 4. 河北省微纳精密光学传感与检测技术重点实验室 秦皇岛 066004

随着我国综合实力的提高,海洋在经济发展、军事安全、科学研究等领域的作用也越来越重要,因而得到了广泛的关注<sup>[1-2]</sup>。传感器作为获取信息的一种重要手段,在海洋监测方面也发挥着越来越大的作用。光纤传感器作为一种新型的无源传感器件,具有灵敏度高、体积小、抗电磁干扰等优点<sup>[3-4]</sup>,已经在很多领域发挥作用。近年来,面向海洋监测应

1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819 2. Research Center for Optical Fiber Sensing, Zhejiang Laboratory, Hangzhou 311121 3. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004 4. Hebei Key Laboratory of Micro-Nano Precision Optical Sensing and Measurement Technology, Qinhuangdao 066004

用的光纤传感器也得到了快速发展,大量的海洋参数传感方案被提出,目前主要涉及到海洋的温度、盐度和深度三个参数的测量<sup>[5]</sup>.由于分布式光纤仅对温度和应变敏感,目前光纤传感器的温度盐度深度测量以点式传感器为主.

光纤光栅 (Fiber bragg grating, FBG) 通常结合敏感材料实现对海洋温盐深参数的测量,通过敏感材料实现灵敏度的放大.中科院半导体所的 Wang 等<sup>[6]</sup>通过将 FBG 固定在毛细不锈钢管中实现了对 FBG 的温度增敏,温度分辨力可以达到 0.01 °C;通过将 FBG 和弹性膜片增敏结构相结合可以实现 1.57 nm/MPa 的压力测量灵敏度<sup>[7]</sup>;将 FBG 和水凝胶相结合<sup>[8]</sup>,利用水凝胶的水分累积和扩散特性将盐度变化转换为 FBG 栅区的应变变化,实现了灵敏度为 9.5 nm/% 的盐度测量.由于 FBG 的光谱形状为一个窄带宽的峰值,光谱的大范围高分辨率解调实现较为方便,而且可以通过波分复用技术实现多个传感器的级联.但是基于该原理的传感器灵敏度普遍偏低.

基于该种情况,研究者们提出了多种基于干涉原理的高灵敏海水温度盐度测量方案.2010年, Liao 等<sup>[9]</sup>通过飞秒激光刻蚀技术在光纤上形成 Mach-Zehnder 干涉仪,直接将待测介质作为传感臂,传感器的折射率灵敏度可以达到 9148 nm/RIU,可以实现 nm/% 量级的盐度灵敏度.本课题组提出了一种同一结构中两种干涉效应共存的传感方案<sup>[10]</sup>,在一个结构中就可以对温度和盐度双参数进行解耦.之后,为了方便传感器的布设,降低外界拉伸对传感器的影响,将透射式传感结构更改为反射式<sup>[11]</sup>.这些基于干涉原理的传感器虽然具有很高的测量灵敏度,但是传感器的复用比较困难.基于干涉原理的光纤传感器的光谱在波长域内是准正弦分布的,传感器的灵敏度和测量范围存在矛盾,虽然已经通过干涉光谱解调算法解决了基于干涉原理的光纤传感器灵敏度和测量范围之间的矛盾<sup>[12-14]</sup>,但是同一系统中通过频分复用技术复用的传感器数量也是有限的.为了解决干涉式光纤传感器的复用问题,本文提出了一种基于调频连续波 (Frequency modulated continuous wave, FMCW) 技术的复用方案,将反射端面返回的光与参考臂的光形成 Mach-Zehnder 干涉仪,用于确定传感器的位置;通过同一传感器不同反射端面间的拍频恢复传感器的光谱.搭建了用于传感器分布测试的系统,编写了数据处理软件用于光谱的采集与处理,通过在系统中接入用于温度盐度测试的级联法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot interferometer, FPI) 探头和用于应变测试的 FPI 探头,分别对应海洋环境测试中的温度、盐

度、深度这三个基本参数,并测试了实验系统中传感器的响应特性.

## 1 理论介绍

图 1 给出了 FMCW 的技术原理图, FMCW 技术利用可调谐激光器 (Tunable laser source, TLS) 发出频率随时间变化的光,反射光因在光纤中传输表现出相对于参考光的延时特性,通过探测器 (Photoelectric detector, PD) 探测到参考光和传感光形成的干涉光,通过干涉光的频率反推得到反射端面的位置信息<sup>[15-16]</sup>.假设入射光是调频速度为  $\gamma$  Hz/s 的线性扫频光,入射光经过耦合器分到参考臂和传感臂上,参考臂的电场表达式可以写为:

$$E_{\text{ref}} = \sqrt{a}E_0e^{j(2\pi f_0 t + \pi\gamma t^2)} \quad (1)$$

其中  $f_0$  表示扫频光的起始频率,  $E_0$  为入射电场的幅值,  $a$  表示耦合器到参考臂的分光比.

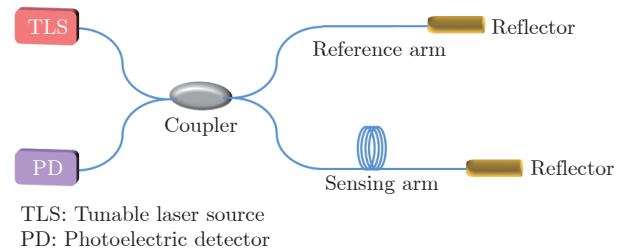


图 1 FMCW 原理示意图  
Fig.1 Schematic graph of FMCW

当入射光从反射面返回时,可以表示为一个与入射光存在时间延时的扫频信号:

$$E_{\text{sen}} = \sqrt{(1-a)r}E_0e^{j[2\pi f_0(t-\tau) + \pi\gamma(t-\tau)^2]} \quad (2)$$

其中  $\tau$  表示由于参考臂与传感臂臂长差造成的时延差,具体可以计算为  $\tau = 2n\Delta l/c$ .  $r$  表示传感器端面的反射率.两束光相干之后通过探测器对相干光进行探测,探测得到的光强可以表示为:

$$I = (E_{\text{ref}} + E_{\text{sen}})(E_{\text{ref}} + E_{\text{sen}})^* = [a + r(1-a)]E_0^2 + 2\sqrt{ar(1-a)}\cos(2\pi\gamma\tau t + 2\pi f_0\tau - \pi\gamma\tau^2) \quad (3)$$

可以看出,拍频信号与参考光和传感臂间的时延存在线性对应关系,进而可以通过该方法确定传感臂与参考臂的长度差.图 2 给出了参考臂和传感臂光频率的变化情况,两束具有时延的光形成了一个具有固定频率差的干涉信号,这与式 (3) 是相同的.当系统中的传感臂中存在多个反射面时,会形成多个与参考臂具有不同光程差的干涉信号,根据光程差可以确定反射面所处的位置,通过不同反射

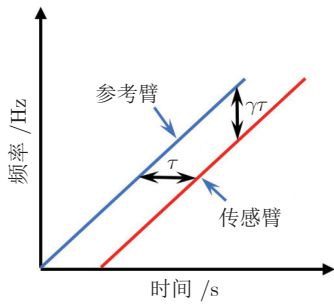


图 2 参考臂和传感臂频率随时间的变化  
 Fig.2 Frequency changing of reference beam and sensing arm with time

端面与参考臂形成的干涉光谱间的拍频, 可以反推得到干涉光谱的信息, 进而可以实现单个传感器干涉光谱的还原.

## 2 仿真分析

本文编写了 MATLAB 代码对基于 FMCW 技术的传感器复用系统进行了仿真, 仿真中采用的系统如图 3 所示, 仿真中设置可调谐激光器的波长扫描范围为 1530 nm ~ 1570 nm, 扫频速度大致为 10 THz/s, 将 99% 注入到传感系统的传感臂中用于得到较强的反射光. 环形器将光注入到复用在传感臂上的传感器中并收集传感器的反射光. 用于传感器分光的耦合器分光比为 95 : 5, 并在系统的 4 m、5 m 和 6 m 位置处设置三个 FPI 传感器, 通过平衡探测器 (Balanced photoelectric detector, BPD) 对相干光进行探测.

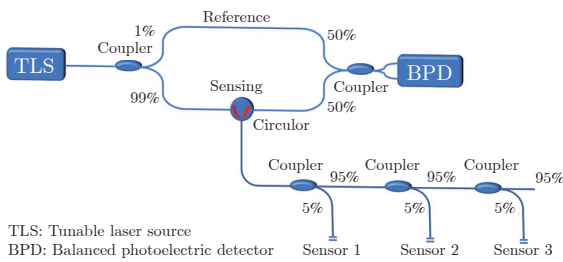


图 3 分布式传感仿真系统图  
 Fig.3 Simulation configuration of the distributed sensing system

图 4 给出了系统的仿真光谱, 仿真光谱包含了不同位置处反射面的光谱叠加情况, 从时域光谱上很难区分不同反射面, 采用快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform, FFT) 对叠加光谱进行了频谱分析, 可以得到不同反射端面的位置信息. 图 5(a) 给出了傅里叶分析的结果, 可以看出, 在频谱的 4 m、5 m、6 m 位置处出现了 3 个特征频率, 频谱中的 1 m 和 2 m 处的特征频率则是由于 3 个 FPI 传感器之

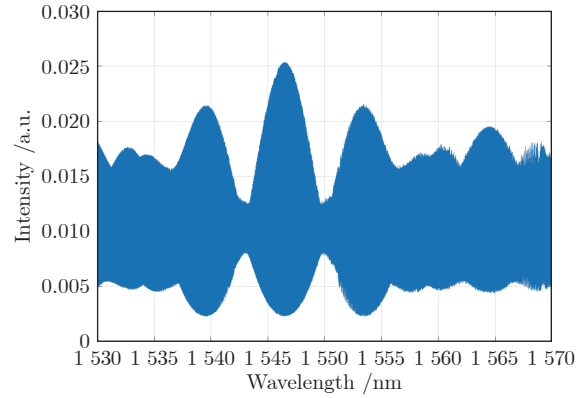


图 4 仿真得到的系统光谱  
 Fig.4 Simulated spectrum of the system

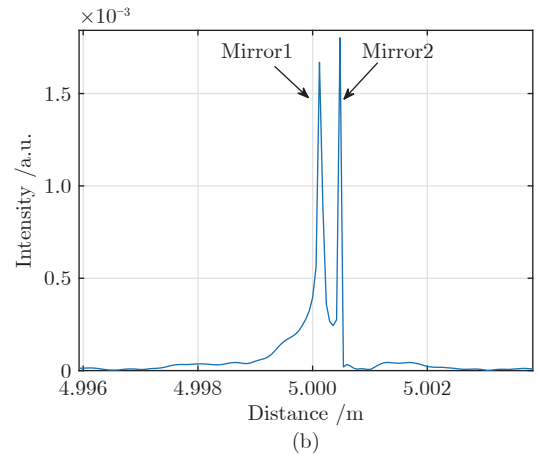
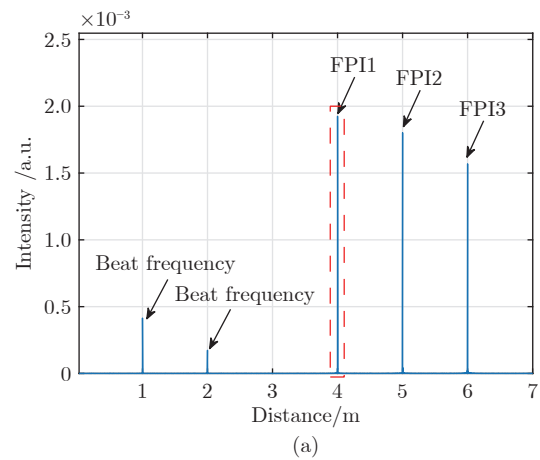


图 5 仿真光谱的频谱特性图 ((a) 仿真光谱频谱特性图; (b) 仿真光谱频谱特性分析放大图)  
 Fig.5 Frequency spectrum of the simulated spectrum ((a) Frequency spectrum of the simulated spectrum; (b) Partial enlarged drawing of the frequency spectrum)

间拍频形成的. 由于传感臂的反射光很弱, 因而传感器间拍频信号的强度也会很弱, 可以通过提高参

考臂信号强度的方法进一步提高参考光与传感光拍频信号强度,降低传感器之间光谱拍频对光谱恢复的影响.由于每个 FPI 都是由相邻很近的两个反射面构成的,为了实现干涉光谱的恢复,对 4 m 处的频谱进行了放大,由图 5(b) 给出,发现两个端面在频域是可以区分的,因而可以实现对传感器光谱的还原.

之后对 FPI 光谱的恢复方法进行了研究,利用矩形窗将传感器特征频谱处的复频谱信号截取出来,补零后对其进行反傅里叶变换,得到还原光谱,如图 6 所示.信号通过带通滤波器后会产生延时,延时的大小与滤波器设置的参数有关,通过将滤波后数据延时点删除可以消除滤波延时的影响.由于恢复的传感器光谱为同一传感器两个反射面与参考臂形成的干涉光谱间的拍频,两个信号的延时特性一致,因而对恢复信号的影响可以忽略.此外,由于系统中同一传感器的延时参数是统一的,即使带通滤波对系统响应光谱有微小影响也是可以忽略的.

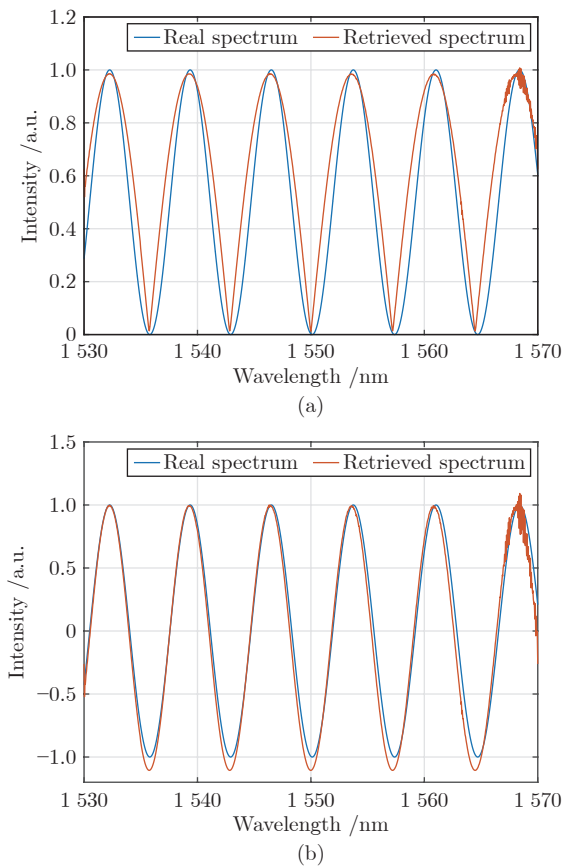


图 6 还原光谱与真实光谱对比 ((a) 周期不匹配的情况; (b) 周期匹配的情况)

Fig. 6 Comparison between the retrieved and real spectrum ((a) Mismatch phenomenon; (b) Match phenomenon)

虽然真实光谱和还原光谱具有近似的谱形,但是还原光谱的谷值处较为尖锐,因为在反傅里叶变换 (Inverse FFT, IFFT) 后对信号进行取模运算,导致信号没有负值部分,这会造成信号的失真.通过分析,发现信号在拍频时导致了频率的减半,具体原因可以由式 (4) 给出,可以看出两个信号在进行拍频之后会形成一个高频和低频信号的乘积,拍频后的低频信号频率为两个信号频率差的一半.因而可以通过倍频的方法将信号频率调整为一致,即对信号做一个平方,本方案中利用积化和差公式将拍频信号倍频,使得拍频信号与真实信号频率相同.

$$\cos(a) + \cos(b) = 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \quad (4)$$

之后对系统中可以复用的传感器数量进行理论计算,第  $N$  个端面的反射强度为:

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} r_m r_{c1,N}^2 (1 - \alpha_N)^2 \prod_{n=1}^{N-1} r_{c2,n}^2 (1 - \alpha_n)^2 \quad (5)$$

其中  $P_{\text{in}}$  表示输入到参考臂中的光,  $r_m$  表示光纤反射端面的反射率,  $P_{\text{out}}$  是反射面反射到探测器的能量.  $r_{c1,N}$  表示第  $N$  个耦合器第 1 个端口的输出能量比,  $r_{c2,n}$  表示第  $n$  个耦合器第 2 个端口的输出能量比,平方表示光在耦合器中传播一个来回,  $\alpha_N$  表示第  $N$  个耦合器的插入损耗.假设本系统中采用 99 : 1 的耦合器将光分配给系统中的传感器,传感器法兰间的连接没有损耗,所有 FPI 传感器端面都置于盐水 (折射率近似为 1.33) 中,端面的反射率  $r_m$  大概为 0.0025,进入传感臂的光功率为 10 mW,传感器中第 500 个传感器的反射能量为  $2.2 \times 10^{-10}$  mW,如果参考臂的输入光功率为 20  $\mu$ W,那么两束光相干后的光功率约为 4.2 nW.这个光强度大于探测器的噪声等效功率,可以通过光电探测器探测得到.

本方案中采用的方案为相干探测方案,最大的传感长度需要综合考虑系统中光源的线宽、数据采集卡的采样率以及可调谐激光器的波长扫描速度;根据光源线宽和相干长度之间的关系:  $\Delta v = c / (2nL)$ ,本方案中采用的可调谐激光器的线宽为 60 kHz,光源的相干长度为 1.66 km.按照本方案中设置的采样率 (62.5 MHz) 和波长扫描速度 (80 nm/s),为了利用参考干涉仪光谱实现等频率重采样,参考干涉仪每个周期至少有 5 个采样点,根据干涉光谱计算公式  $\Delta \lambda = \lambda^2 / (2nL)$ ,系统的最大传感距离为 125 m.

### 3 实验系统搭建

为了对系统的特性进行测试,搭建了实验测试系统,为了实现高的距离分辨力,系统中采用的光

频率扫描范围应该设置的尽可能大, 本文采用的可调谐激光器是等波长间隔扫描的, 然而干涉光谱在波长域并不是标准的正弦分布, 根据干涉仪的干涉光谱公式  $y = \cos(2\pi 2nl/\lambda)$ , 波长位于正弦函数的分母上, 虽然波长相对于腔长较小, 得到的干涉光谱随波长是一个类正弦信号, 但是这也会导致 FFT 分析结果不准确, 尤其是在波长范围较大的情况下. 为了消除激光器非线性扫描的影响, 本方案中采用了附加干涉仪作为重采样的标准, 利用干涉光谱在频域是标准三角函数的特点, 三角函数在零点之间的间隔是确定的, 通过利用参考干涉仪的零点实现光谱的等频率间隔重采样.

搭建了实验系统如图 7 所示的带有附加干涉仪的传感系统. 采用的光源为波长范围为 1480 nm ~ 1640 nm, 品牌为 Santec, 型号为 TSL770 的可调谐激光器, 调谐速度为 0 ~ 200 nm/s. 系统中使用品牌为 Conquer, 型号为 KG-PR-200 M 的光探测器, 探测带宽为 200 MHz, 用于获取参考部分的干涉信号, 所选的 PD 的波长探测范围为 850 nm ~ 1650 nm. 通过 Thorlabs 品牌的 PDB570C 型号的 BPD 将传感部分的参考臂与传感臂的干涉光进行相干探测. 本方案中采用的 BPD 工作波长范围可以覆盖 1200 nm ~ 1700 nm, 探测带宽可以覆盖 0 ~ 400 MHz.

选用 Advantech 公司的 PCIE-1840 采集卡 (Data acquisition, DAQ) 作为信号采集器件将探测器得到的信号读入电脑中, 该采集卡可以实现 4 通道 16 位分辨率的信号采集, 每个通道的采样率可以达到 125 MHz, 在本实验中将采集卡的采样率设置为 62.5 MHz, 实验中可调谐激光器的波长范围为 1530 nm ~ 1570 nm, 波长调谐速度为 80 nm/s, 数

据每次采样时间为 0.5 s. 需要用到采集卡的三个通道, 一个通道用作采集卡的触发信号, 一个通道用于参考信号的采集, 一个通道用于传感信号的采集. 在利用参考干涉仪的光谱进行重采样时, 将参考信号作为参考时钟, 信号的等波数采样可以通过硬件法或者软件法实现. 硬件法是通过将 PD 探测得到的参考信号作为外部时钟信号输入到采集卡中. 软件法则是将 PD 探测到的参考采样信号和 BPD 探测到的传感信号同时输入到采集卡的信号通道中. 由于每次扫描产生的参考信号不能连续稳定存在, 因而不能作为一个可靠的外部时钟. 此外, 采集卡对外部时钟的频率是有限制的, 参考时钟的频率应该为 10 MHz 左右才可以满足外部时钟采集需求. 故采用了软件法对光谱进行重采样.

为了实现对系统光谱的处理与单个传感器的光谱恢复, 基于 LabView 开发环境编写了用于数据处理的软件, 用于系统光谱的实时显示与处理. 图 8 给出了数据处理软件的前面板, 前面板包含多个用于设置采集系统的输入控件, 主要包括可调谐激光器的起始扫描波长、终止波长、扫描速度的输入, 采集卡的采样速率也可以通过输入控件进行设置, 信号通道下拉菜单可以对信号的输入通道进行选择. 此外, 为了提高数据的读取效率, 设置了用于调整采样段长与采样段数的输入控件. 为了直观地显示光谱信息, 图中右侧的 4 个波形图分别用于显示原始采样光谱、重采样后的光谱、重采样光谱的频谱特性图以及还原后传感器的干涉光谱. 理论上可以做到全部传感器光谱的显示, 由于目前复用规模较小, 为了清晰地显示单个光谱的变化情况, 显示面板中只显示了单个传感器光谱的恢复, 之后会考虑进行多个传感器光谱的同时处理, 利用还原光谱显

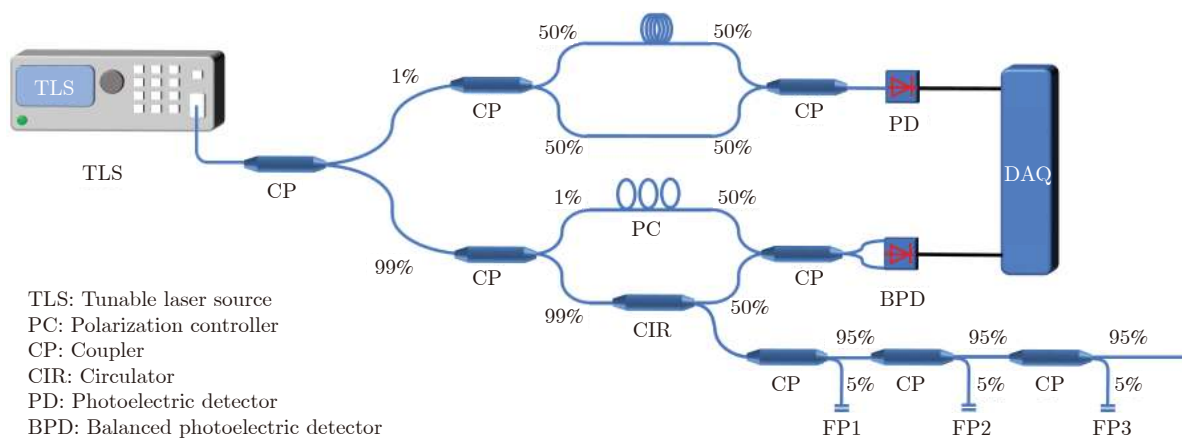


图 7 实验搭建的 FMCW 系统

Fig. 7 FMCW system configuration in experiment

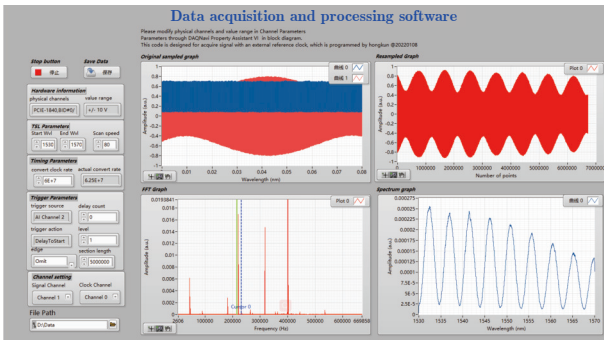


图 8 数据采集处理软件前面板

Fig. 8 Front panel of the data processing software

示控件作为带通滤波的参数选择参考, 构建多个传感器光谱滤波参数数组, 实现多个传感器光谱同时恢复.

图 9 给出了数据采集处理软件的后面板, 后面板中对数据的主要操作包括采集卡配置、信号重采样、FFT 频谱分析、IFFT 光谱还原以及光谱存储几个部分, 这 3 个过程都涉及到大量的数据操作, 开始时采用了 LabView 内置的 VI 函数对光谱数据进行处理, 由于光谱数据量较大, 处理效率较低. 之后改用 LabView 内置的 MATLAB 脚本 VI 函数作为数据处理函数, 大大地提高了数据处理速度. 本实验中利用参考干涉仪作为参考时钟对传感光谱进行等频率重采样, 为了方便信号采样, 将时钟信号减去基值后通过比较器将波形从正弦波转换为方波, 当方波两个相邻采样点出现正负跳变时, 采集一个传感信号点, 通过该方法可以实现快速的传

感光谱重采样. 利用 FFT 对重采样的信号进行频谱特征分析, 之后通过矩形窗截取传感光谱的特征频谱, 实现传感器光谱的恢复.

### 4 实验验证

在所设计的大容量传感器复用系统中进行了应变和盐度实验. 本文侧重于分布式干涉式光纤传感器的实现, 因而选取了应变模拟压力的测量效果, 海洋的压力通过增敏结构以应变的形式传递到光纤传感器结构上. 在系统中接入了 3 个传感器, 传感器 1 和传感器 3 为常见的基于单模-空心-单模结构的光纤 FPI 应变传感器, 该传感器通过在单模光纤中间熔接一段空心光纤制作; 传感器 2 为利用单模光纤错位熔接制作的双 FPI 级联的温盐传感器, 该传感器的制作方法可以参考本课题组的论文<sup>[12]</sup>. 首先将传感器接入到 FMCW 系统中, 经过采集软件的重采样之后, 得到的复合光谱如图 10 所示.

之后用 FFT 分析了复合光谱的频率特性, 图 11 展示出了光谱的频谱特性, 子图中给出了接入 3 个传感器的频谱情况, 对应整体频谱中蓝色椭圆圈出的部分. 可以看出, 由于本方案中采用的波长扫描范围较大, 所以光谱的频率分辨率较高, 可以区分同一传感器内的不同反射端面. 图中紫色的特征峰值是由于光纤法兰连接处的反射造成的. 可以明显地看出, 传感器 3 的光强远大于传感器 1 和传感器 2 的光强, 这是为了能够区分传感器位置. 传感器 3 接入的光为 95%, 传感器 3 的反射光强度接近前两个传感器的 20 倍, 且 3 个传感器是等间隔分布的,

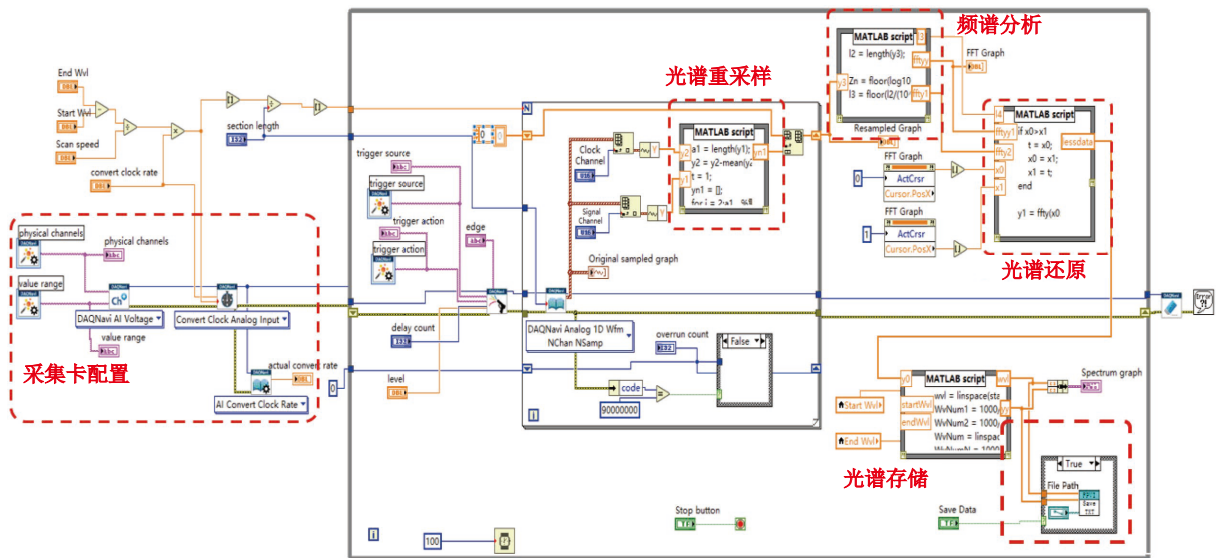


图 9 数据处理软件后面板

Fig. 9 Back panel of the data processing software

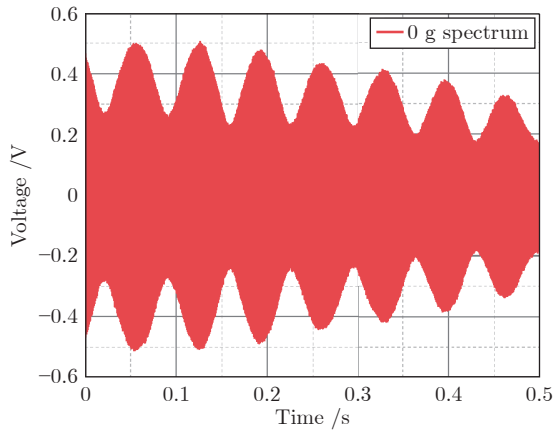


图 10 重采样后的复合传感光谱  
Fig. 10 Composite sensing spectrum after resampling

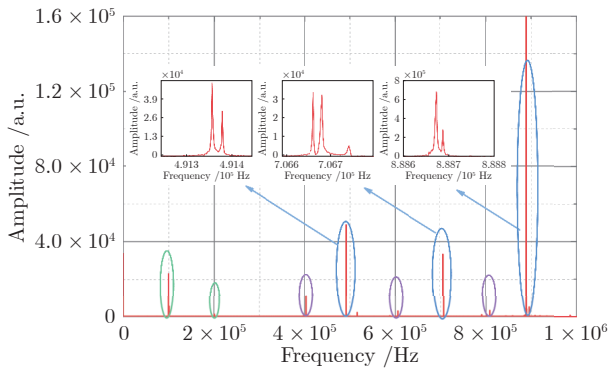


图 11 重采样光谱的频谱图  
Fig. 11 Frequency spectrum of the resampled spectrum

通过这种方法可以快速地找出系统中 3 个传感器的特征频率. 图中绿色的特征频率是由于传感器以及法兰之间的反射光拍频形成的.

图 12 给出了传感器的应力测试系统, 通过三维位移滑台用于固定光纤, 铁架台用于悬挂光纤, 将砝码悬挂在光纤自由端, 用于给传感结构施加定量的应力. 在弹性范围内, 光纤的应力和所施加的质量之间存在线性对应关系. 因为砝码的质量精度可以做到很高, 本文采用砝码悬挂法对光纤实现精确的应变控制.

对传感器中传感器 1 进行应力测试后, 从数据处理软件上得到了不同应变下的光谱, 对光谱数据进行了处理. 对获取的干涉光谱进行平滑与寻峰操作, 得到了不同质量下的干涉峰值, 对不同质量下的干涉峰值进行拟合, 得到的拟合结果如图 13(a) 所示, 可以看出, 随着所施加砝码质量的增加, 干涉光谱的峰值波长表现出红移响应, 传感器的灵敏度

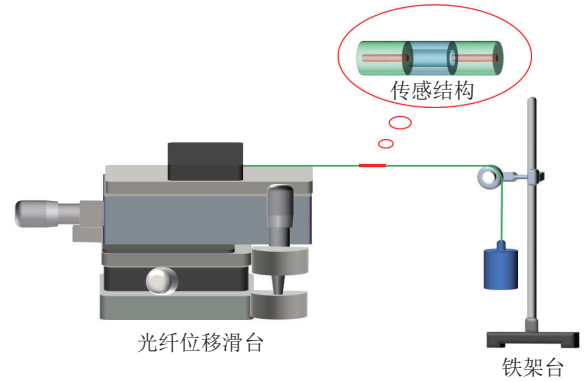


图 12 光纤应力特性测试装置  
Fig. 12 Strain characteristic test device of the optical fiber

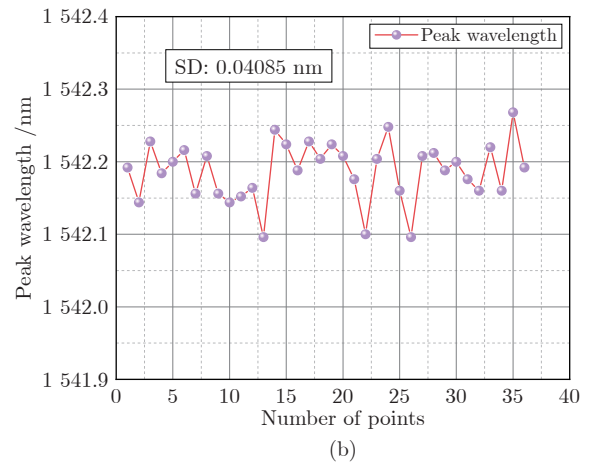
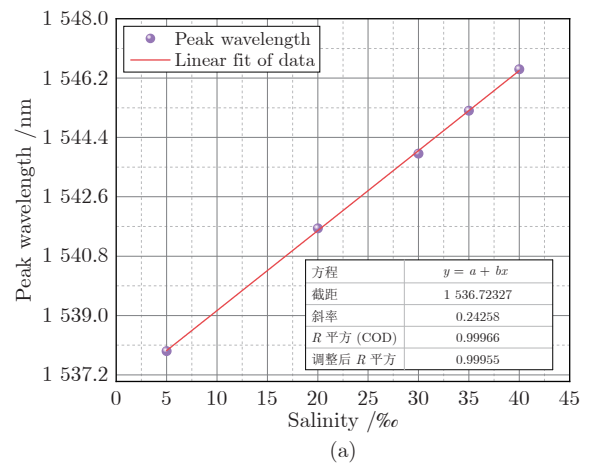


图 13 应力传感器响应特性 ((a) 不同质量下谐振波长拟合效果; (b) 固定质量下传感器波长监测)  
Fig. 13 Responses of the strain sensor ((a) Wavelength fitting result under different weights; (b) Wavelength record under a fixed weight)

可以达到 23.35 pm/g, 拟合线性度可以达到 0.997. 图 13(b) 给出了传感器 1 在同一质量下连续监测 38 次的波长变化情况, 测量标准差 (Standard devi-

ation, SD) 可以达到 40.85 pm, 这可能是由于环境波动以及光源抖动等因素造成的。

之后对双 FPI 级联的温盐传感器的盐度 (折射率) 响应特性进行测试, 将传感器 2 放置于设计的盐度传感平台上. 通过胶头滴管向传感平台一侧滴加盐水, 通过吸水纸从另一侧吸收盐水, 将待测浓度的盐水进行 3 次冲刷用于减小浓度差的影响. 本方案中采用吸水纸的原因在于盐水的表面张力相对于有机溶液较大, 盐水无法可靠浸入传感结构 (或者传感器的响应时间较长), 影响测试结果的准确性. 在实际应用中不需要更换液体, 只需要保证待测液体浸入到传感器即可, 可以考虑事先将传感器结构浸泡于有机溶液中. 由于本传感器结构较小, 浸泡需要的有机溶剂较少, 对实际测量产生的影响可以忽略, 测试环境由图 14 给出. 盐度测试采用的是海洋国家计量中心生产的中国系列标准海水.

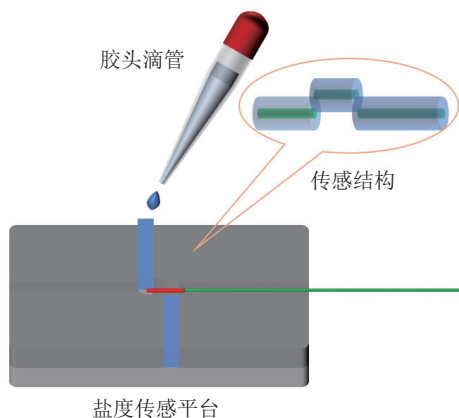


图 14 传感器盐度特性测试装置  
Fig. 14 Salinity characteristic test device of the sensor

图 15 给出了传感器的光谱情况, 图 15(a) 表示传感器的原始光谱, 这包含两个 FPI 传感器的混叠光谱, 通过带通滤波器将两个传感器的光谱进行恢复, 对盐度敏感的传感器光谱在图 15(b) 中给出, 对温度敏感的传感器光谱在图 15(c) 中给出. 可以看出, 使用带通滤波器可以很好地区分两个传感器光谱.

本实验中仅对盐度响应特性进行测试, 对不同盐度下的响应光谱进行了分析. 分析结果在图 16 中给出, 对光谱的特征峰值与盐水浓度进行了线性拟合, 光谱随着盐度的增加表现出右移响应. 传感器的盐度灵敏度可以达到 242.58 pm/‰, 拟合线性度可以达到 0.9996, 传感器的盐度和波长之间具有很好的响应特性. 该传感器的盐度灵敏度与文献 [17] 基本是一致的, 可以认为传感器的性能不受到复用系统影响. 传感器随盐度变化的波长移动量达到

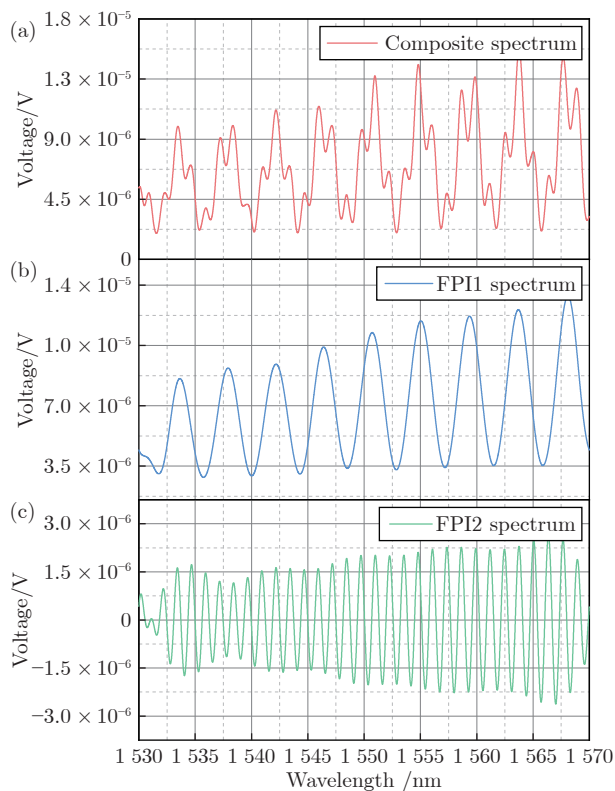


图 15 传感器 2 的光谱分解效果

Fig. 15 Spectrum decomposition of sensor 2

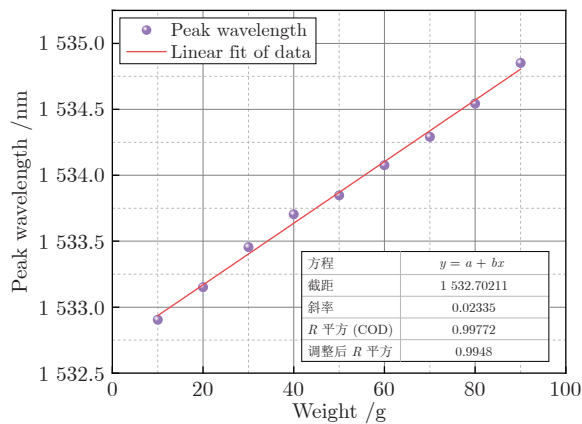


图 16 传感器 2 盐度响应特性拟合

Fig. 16 Salinity response characteristic fitting result of sensor 2

9.7 nm, 光谱移动量接近光谱周期的 2 倍, 采用光谱峰值追踪法无法进行有效的光谱处理. 本次实验中, 结合经验法对光谱进行寻峰, 之后的实验可以考虑采用干涉光谱腔长解调技术对光谱进行解调<sup>[12]</sup>, 就可以实现大动态范围、高分辨力的光谱解调.

图 17 给出了传感器在同一盐度下光谱特征峰值连续监测的效果, 通过计算得到该传感器的波长标准差为 20.68 pm, 对应盐度的标准差为 0.085‰.



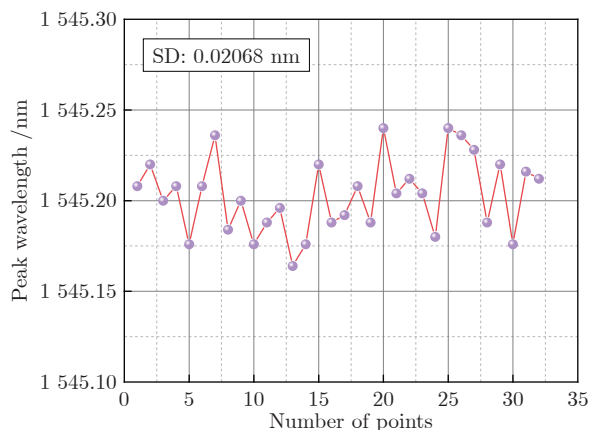


图 17 传感器 2 盐度光谱的连续监测效果

Fig. 17 Continuous wavelength record of the salinity spectrum of sensor 2

连续监测结果表明, 传感器在该复用系统中仍然可以实现较好的传感效果。

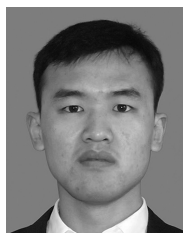
## 5 结论

本文提出了一种基于 FMCW 原理的干涉式光纤传感器的复用方法, 利用传感器的反射端面和参考臂形成的 Mach-Zehnder 干涉光谱之间的拍频实现传感器光谱还原, 搭建了用于大容量传感器复用的实验系统, 编写了用于数据采集与处理的软件, 实现了数据的实时采集以及对系统内单个传感器光谱的还原, 测试了系统中传感器的温度和盐度响应特性, 实验结果表明, 该复用系统在实现大容量传感器复用的同时不影响单个传感器的传感性能。所提出的复用方法可以用于基于光纤传感器阵列的海洋参数立体剖面监测以及多点温度监测等应用场合。

## References

- 1 Wang Li, Wang Yong-Jie, Yu Fei, Li Fang. Application of optical fiber sensing technology in the field of physical ocean observation. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, **58**(13): 199–216 (王力, 王永杰, 于非, 李芳. 光纤传感技术在物理海洋观测领域的应用研究. *激光与光电子学进展*, 2021, **58**(13): 199–216)
- 2 Li Da-Hai, Wu Li-Xin, Chen Zhao-Hui. Strategic direction and construction path of transparent oceans. *Journal of Shandong University*, 2019, **2**: 130–136 (李大海, 吴立新, 陈朝晖. “透明海洋”的战略方向与建设路径. *山东大学学报*, 2019, **2**: 130–136)
- 3 Qian Y, Zhao Y, Wu Q L, Yang Y. Review of salinity measurement technology based on optical fiber sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, **260**: 86–105
- 4 Min R, Liu Z Y, Pereira L, Yang C K, Sui Q, Marques C. Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: A review. *Optics & Laser Technology*, 2021, **140**: Article No. 107082

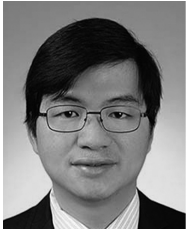
- 5 Zhou L J, Yu Y, Meng Z. Review of fiber optic ocean conductivity-temperature-depth sensor. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, **58**(13): 275–289 (周灵钧, 于洋, 孟洲. 光纤海洋温盐深传感器研究进展. *激光与光电子学进展*, 2021, **58**(13): 275–289)
- 6 Wang L, Wang Y J, Wang J F, Li F. A high spatial resolution FBG sensor array for measuring ocean temperature and depth. *Photonic Sensors*, 2020, **10**(1): 57–66
- 7 Huang J, Zhou Z D, Wen X Y, Zhang D S. A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation. *Measurement*, 2013, **46**(3): 1041–1046
- 8 Sun M Y, Jiang H T, Shi B, Zhou G Y, Inyang H, Feng C X. Development of FBG salinity sensor coated with lamellar polyimide and experimental study on salinity measurement of gravel aquifer. *Measurement*, 2019, **140**: 526–537
- 9 Liao C R, Wang Y, Wang D N, Yang M W. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer embedded in FBG for simultaneous refractive index and temperature measurement. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(22): 1686–1688
- 10 Zheng H K, Lv R Q, Zhao Y, Tong R J, Lin Z T, Wang X X, et al. Multifunctional optical fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and salinity. *Optics Letters*, 2020, **45**(24): 6631–6634
- 11 Zheng H K, Zhao Y, Lv R Q, Lin Z T, Wang X X, Zhou Y F, et al. Study on the temperature and salinity sensing characteristics of multifunctional reflective optical Fiber Probe. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, **70**: Article No. 9514308
- 12 Zheng H K, Lv R Q, Zhao Y, Wang X X, Lin Z T, Zhou Y F, et al. A novel high accuracy optical path difference compensation method based on phase difference technology. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, **137**: Article No. 106367
- 13 Xie J H, Wang F Y, Pan Y, Wang J J, Hu Z L, Hu Y M. High resolution signal-processing method for extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors. *Optical Fiber Technology*, 2015, **22**: 1–6
- 14 Zhou X L, Yu Q X. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer for subnanometer measurement. *IEEE Sensors Journal*, 2010, **11**(7): 1602–1606
- 15 Lou X T, Feng Y B, Chen C, Dong Y K. Multi-point spectroscopic gas sensing based on coherent FMCW interferometry. *Optics Express*, 2020, **28**(6): 9014–9026
- 16 Hanto D, Iiyama K. Low-cost interrogation of long-distance and multipoint FBG sensor using incoherent-FMCW optical ranging system. *IEEE Sensors Journal*, 2019, **20**(7): 3599–3607
- 17 Zheng H K, Zhao Y, Lv R Q, Lin Z T, Wang X X, Zhou Y F, et al. Reflective optical fiber sensor based on dual Fabry Perot cavities for simultaneous measurement of salinity and temperature. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**(24): 27495–27502



郑洪坤 之江实验室光纤传感研究中心博士后。2017 年获得东北大学自动化专业学士学位, 2022 年获得东北大学检测技术与自动化装置专业博士学位。主要研究方向为光纤传感技术。E-mail: hongkunzheng@outlook.com

(ZHENG Hong-Kun Postdoctor at Research Center for Optical Fiber Sensing, Zhejiang

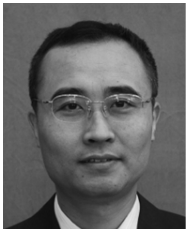
Laboratory. He received his bachelor degree in automation and Ph.D. degree in detection technology and automation device from Northeastern University in 2017 and 2022, respectively. His main research interest is optical fiber sensing technology.)



**吕日清** 东北大学信息科学与工程学院副教授。2008 年获得东北大学生物医学工程专业学士学位, 2010 年获得东北大学电路与系统专业硕士学位, 2014 年获得东北大学检测技术与自动化装置专业博士学位。主要研究方向为磁流体, 光纤传感器, 纳米材料和机器学习。本文通信作者。

E-mail: lvriqing@ise.neu.edu.cn

**(LV Ri-Qing** Associate professor at College of Information Science and Engineering, Northeastern University. He received his bachelor degree in biomedical engineering, master degree in circuits and systems and Ph.D. degree in detection technology and automation device from Northeastern University in 2008, 2010 and 2014, respectively. His research interest covers magnetic fluids, fiber-optic sensors, nanomaterials and machine learning. Corresponding author of this paper.)



**赵勇** 东北大学信息科学与工程学院教授。1996 年获得哈尔滨工业大学精密仪器系学士学位, 2001 年获得哈尔滨工业大学精密仪器系博士学位。主要研究方向为光纤传感器与器件的开发, 光纤布拉格光栅传感器, 新型传感器材料与原理和光学测量技术。

E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn

**(ZHAO Yong** Professor at College of Information Science and Engineering, Northeastern University. He received his bachelor degree and Ph.D. degree in precision instrument from Haerbin Institute of Technology in 1996 and 2001, respectively. His research interest covers development of fiber-optic sensors and devices, fiber Bragg grating sensors, novel sensor materials and principles and optical measurement technologies.)



**彭 昀** 东北大学秦皇岛分校控制工程学院讲师。2015 年获得河北科技大学机械工程学院学士学位, 2017 年和 2021 年分别获得东北大学硕士学位和博士学位。主要研究方向为光纤传感器件的开发, 量子等离激元传感器及量子测量技术。

E-mail: pengyun@neuq.edu.cn

**(PENG Yun** Lecturer at School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao. He received his bachelor degree from School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology in 2015. He received his master and Ph.D. degrees from Northeastern University in 2017 and 2021, respectively. His research interest covers development of fiber-optic sensors and device, quantum plasmonic sensors and quantum measurement technologies.)



**林子婷** 东北大学信息科学与工程学院博士研究生。2018 年获得东北大学控制工程学院学士学位。主要研究方向为光纤传感器, 海洋多参数检测。

E-mail: linziting@stumail.neu.edu.cn

**(LIN Zi-Ting** Ph.D. candidate at College of Information Science and Engineering, Northeastern University. She received her bachelor degree from School of Control Engineering, Northeastern University in 2018. Her research interest covers optical fiber sensors and ocean multi parameter detection.)



**刘睿杰** 东北大学信息科学与工程学院博士研究生。2022 年获得曲阜师范大学网络空间安全学院学士学位。主要研究方向为光纤传感, 机器学习。

E-mail: 2210332@stu.neu.edu.cn

**(LIU Rui-Jie** Ph.D. candidate at College of Information Science and Engineering, Northeastern University. He received his bachelor degree from Cyberspace Security College of Qufu Normal University in 2022. His research interest covers optical fiber sensor and machine learning.)