

文章编号 1004-924X(2024)22-3257-09

高灵敏度、高精度的光栅应变传感系统

王天祺, 南鑫灏, 蔡林原, 谷三峰, 邓明*
(重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044)

摘要: 为了实现对应变的高灵敏、高分辨率测量, 本文搭建了基于色散增强的光载微波干涉 (Optical Carrier Microwave Interferometer, OCMI) 应变测量系统。首先, 根据双边带调制理论推导了 OCMI 应变传感系统的传递函数, 得到了光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 光学波长漂移量与微波频率之间的映射关系; 接着, 搭建了应变传感系统, 通过监测高频频率对比不同色散组合下系统的灵敏度, 表明反向接入线性啁啾光纤布拉格光栅 (Linearly Chirped Fiber Bragg Grating, LCFBG) 能够有效增强灵敏度, 且 LCFBG 的色散量越大, 系统的灵敏度越高。实验结果表明: 采用色散增强的应变传感系统的灵敏度可达 $43.75 \text{ kHz}/\mu\epsilon$, 是无 LCFBG 系统灵敏度的 42 倍。本文提出的方案具有高的稳定性和测量分辨率, 这为弱物理量的测量提供了一种参考方法。

关键词: 光纤光栅; 光载微波干涉; 线性啁啾布拉格光栅; 应变传感; 高灵敏度

中图分类号: O438; TN823 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243222.3257

Grating strain sensing system with high sensitivity and high precision

WANG Tianqi, NAN Xinhao, CAI Linyuan, GU Sanfeng, DENG Ming*

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

* Corresponding author, E-mail: dengming@cqu.edu.cn

Abstract: In order to measure the strain with high sensitivity and high resolution, an OCMI strain measuring system based on dispersion enhancement was established. Firstly, the transfer function of OCMI strain sensing system was derived based on double-sideband modulation theory, and the mapping relationship between FBG optical wavelength drift and microwave frequency was obtained. Then, a strain sensing system was built, and the sensitivity of the system under different dispersion combinations was compared by monitoring high frequency frequencies. It was shown that reverse access to LCFBG could effectively enhance the sensitivity, and the greater the dispersion of LCFBG, the greater the sensitivity of the system. The experimental results show that the sensitivity of the dispersion-enhanced strain sensing system can reach $43.75 \text{ kHz}/\mu\epsilon$, which is 42 times that of the system without LCFBG. The scheme proposed in this paper has high stability and resolution, which provides a reference method for the measurement of weak physical quantities.

Key words: fiber bragg grating; optical carrier microwave interference; linearly chirped fiber bragg grating; strain sensing; high sensitivity

收稿日期: 2024-05-19; 修订日期: 2024-07-08.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61905029, No. 62075022); 重庆市科技创新发展项目 (No. cstc2020jscx-msxmX0216)

1 引言

随着科技与生产力的快速发展,高端制造业中核心部件的应变监测尤为重要。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、重复性好和抗电磁干扰等优点常用于应变监测。FBG传感器的工作原理是外界物理量的变化会引起光纤结构参数/折射率的变化而引起共振波长在反射或透射光谱中的漂移。因此,精确提取FBG传感器的共振波长可以实现外界物理量的精密测量,例如:李天梁等人建立了FBG中心波长漂移量与形状函数及弯曲方向角之间的神经网络模型,实现了物体的三维形状重构^[1];孙晓等人利用信号处理的方法,将FBG中心波长漂移转换为综合异常指数,实现传感器的异常和故障判别^[2]。常用的FBG传感器解调方案主要包括光谱分析法、光纤Fabry-Perot滤波器法^[3]、可调谐激光器法^[4]和光纤干涉仪(Fiber Optic Interferometer, OFI)法^[5]。在这些方法中,OFI方法由于具有高分辨率和高灵敏度的优点而受到广泛应用,然而干涉光的光学相位对环境扰动非常敏感,降低了测量精度。

近年来,许多微波光子解调方法被提出且应用于FBG传感^[6-9]。由于同时结合了光学和微波的优势,基于微波光子的FBG传感系统提高了测量速度和分辨率^[10]。其中光载微波干涉(Optical Carrier Microwave Interference, OCMI)这一概念在FBG传感器的应变解调中备受关注,例如:2016年XIA等人提出了一种基于OCMI的FBG解调系统,将FBG的波长漂移通过色散差转换为两个干涉载波的相位差变化,最终通过测量射频信号强度的变化,获得了 $0.008\ 35\ \text{a. u.} / \mu\epsilon$ 的最大灵敏度^[11];2023年WANG等人提出一种基于游标效应OCMI的FBG应变传感系统,使用两个并联的光纤环产生游标效应,获得了 $33.862\ \text{kHz} / \mu\epsilon$ 的测量灵敏度^[12]。OCMI凭借其结构简单、对探测光偏振不敏感和高信噪比等优势^[13],逐渐成为了解调FBG的一种理想方案。OCMI系统通常由光源、调制器、色散模块和光电探测器组成。微波信号对光源进行调制,调制

后的光信号进入FBG传感器,FBG传感器不仅改变信号的振幅,还改变信号的相位,随后由光电探测器进行光电转换,对所得到的模拟微波电信号进行数字化和处理。目前为止,研究者们已经设计了不同构型的光电混合链路将FBG传感器的波长漂移量映射到微波频率的变化^[14-15]、强度的变化^[16]或者相移^[17]。本质而言,OCMI是将光域传感信息映射到微波信号参量上,利用电测量仪器(矢量网络分析仪、电频谱分析仪)的高分辨率实现外界参量的高速、高分辨率测量。同时,基于OCMI的FBG传感系统的灵敏度主要由信号的相位决定,对应于时间延迟,可以通过色散模块进行调谐^[18],因此,提高系统的色散延迟即可提高系统的测量灵敏度。传统的色散模块通常由单模或色散补偿光纤组成,但这会增加复杂性并降低系统的稳定性。LCFBG是光纤通信中常用的色散补偿元件,可以在较短的光学长度内提供大量的色散,引入LCFBG可以有效降低色散模块的复杂度。更重要的是,可以通过正向和反向接入LCFBG引入相反斜率的群延迟响应灵活调控腔色散^[19]。

本文设计了一种基于色散增强的OCMI应变测量系统,该系统将两个LCFBG反向连接到迈克尔逊干涉仪两臂,以提供相反的色散,此时干涉仪两臂同时对测量参数敏感。当测量参数改变时,参考单元和测量单元的相对色散量累积,提升了系统测量的灵敏度。实验结果表明,采用色散增强的应变传感系统的灵敏度可达 $43.75\ \text{kHz} / \mu\epsilon$,是无LCFBG系统灵敏度的42倍。本文提出的方案具有高的稳定性和抗干扰性,这为恶劣环境下的应变测量提供了一种方法。

2 灵敏度增强的机理

利用OCMI系统测量FBG传感器轴向应变的系统如图1所示。该系统的原理可以使用双边带调制(Double Sideband, DSB)模型来分析。经EOM调制后的光场可以表示为公式(1)^[20],其中 f_c 为光载波的中心频率, $m_a V$ 表示EOM的调制深度, f_{RF} 为微波信号的频率。将调制信号用第一类

贝塞尔函数展开,由于高阶边带的能量远小于低阶边带和载波能量,因此只保留零阶和一阶项,如公式(2)所示。从公式(2)可知调制后的信号共包含三个频率,即载波频率和两个边带频率。当光载微波信号通过OC后,不同频率的光将在LCFBG1的不同位置反射,因此载波 f_c 与两个边带 f_c+f_{RF}, f_c-f_{RF} 将经历不同的相移,假设相位延迟大小分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$,调制信号进一步表示为公式(3)。经过LCFBG的光载微波信号到达PD后,PD恢复的微波信号的电场可以表示为公式(4),其相位延迟通过泰勒展开进行表示,其中 β_1 和 β_2 分别为一阶和二阶泰勒展开, D 为色散介质的色散量, L 为色散介质长度。同理, E_2 与 E_1 幅

度相同,但时延为 $\Delta\tau$ 的调制信号 E_2 通过PD恢复的电场可以表示为公式(5)。将公式(4)和公式(5)两端进行傅里叶变换,得到OCMI应变传感系统的传递函数,表示为公式(6),其中 $H_1(\omega)$ 表示经过LCFBG的微波调制信号的频率响应; $H_2(\omega)$ 表示系统的周期性频率响应。在图1中,两个LCFBG在系统中反向接入,分别提供正色散和负色散,此时若入射光波长发生变化,微波载波频率和边带将会经历更多的相移,如图1(c)所示。LCFBG1返回的信号经PD恢复出的微波信号如图1(d)所示;同理对于LCFBG2,微波载波频率和边带将会经历更少的相移,如图1(e)所示,经PD恢复出的微波信号如图1(f)所示。

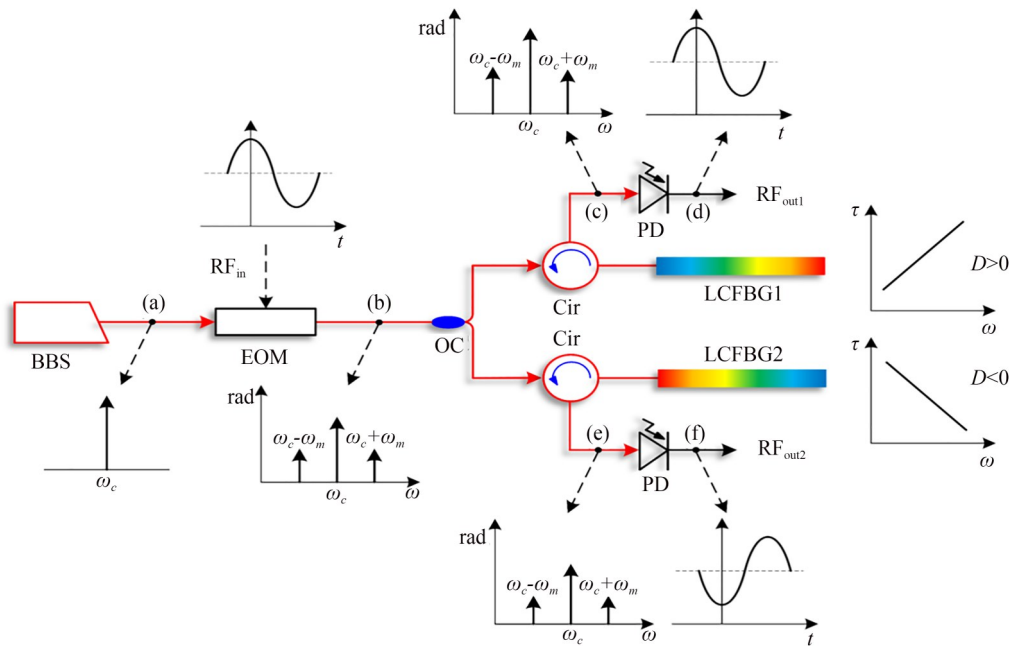


图1 基于反接LCFBG的灵敏度提升原理图

Fig. 1 Block diagram of sensitivity improvement based on reverse LCFBG

系统的时延 $\Delta\tau$ 为OCMI两臂之间的时间延迟,其系统的自由光谱区(Free Spectral Range, FSR)和通带在微波域中的 N 阶谐振频率可以表示为公式(7),其中 c 是光速, n_{eff} 是光纤的有效折射率, ΔL 是两臂光纤的长度差。当外部应变施加到FBG时,谐振波长发生偏移,使得光路中的时间延迟发生变化,并且变化表示为公式(8),其中 D_F 和 D_L 分别表示光纤和LCFBG的色散量; L_F 和 L_L 分别表示光纤和LCFBG的长度; $\Delta\lambda_{FBG}$ 为在应变下FBG的波长漂移量。因此,可以建立频

率响应和应变之间的函数关系来表征外部应变,如公式(9)所示,可以看出观测的谐振频率阶数越大,累积的时延量越多,在实验过程中,通过对高阶谐振频率的漂移进行监测从而获得更高的频率分辨率。且频率漂移与系统的总灵敏度($DL1LL1-DL2LL2$)成正比,因此将两个LCFBG作为迈克尔逊干涉仪两臂并反向接入OCMI系统中可以有效增大系统的灵敏度。其当LCFBG反向接入OCMI系统中可以有效增大系统的灵敏度。接下来,通过实验进行验证。

$$E_{out}(f_c, t) = E_{in}(f_c, t) \cdot \{ \cos [m_a V \cos(2\pi f_{RF} t)] - \sin [m_a V \cos(2\pi f_{RF} t)] \}, \quad (1)$$

$$E_1(t) = J_0 \cos(2\pi f_c t) - J_1 \cos[2\pi(f_c + f_{RF})t] - J_1 \cos[2\pi(f_c - f_{RF})t], \quad (2)$$

$$E_1(t) = J_0 \cos(2\pi f_c t + \varphi_1) - J_1 \cos[2\pi(f_c + f_{RF})t + \varphi_2] - J_1 \cos[2\pi(f_c - f_{RF})t + \varphi_3], \quad (3)$$

$$E_{RF1}(t) \propto \cos\left(\frac{\varphi_3 + \varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \cdot \cos\left(2\pi f_{RF} t + \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{2}\right) = \cos(2 \cdot \beta_2 \cdot \pi^2 \cdot f_{RF}^2 \cdot L) \cdot \cos(2\pi f_{RF} t + \beta_1 \cdot 2\pi f_{RF} \cdot L + 4\beta_2 f_c f_{RF} \cdot \pi^2 \cdot L) = \cos\left(\frac{\pi D_1 L \lambda_0^2 f_{RF}^2}{c}\right) \cdot \cos(2\pi f_{RF} t + \beta_1 \cdot 2\pi f_{RF} \cdot L + 4\beta_2 f_c f_{RF} \cdot \pi^2 \cdot L), \quad (4)$$

$$E_{RF2}(t) = \cos\left(\frac{\pi D_2 L \lambda_0^2 f_{RF}^2}{c}\right) \cdot \cos(2\pi f_{RF} (t + \Delta\tau) + \beta_1 \cdot 2\pi f_{RF} \cdot L + 4\beta_2 f_c f_{RF} \cdot \pi^2 \cdot L), \quad (5)$$

$$H(\omega) \propto \underbrace{\cos\left(\frac{\pi(D_1 - D_2)L\lambda_0^2 f_{RF}^2}{c}\right)}_{H_1(\omega)} \cdot \underbrace{\exp[j\omega_m(n-1)\Delta\tau]}_{H_2(\omega)}, \quad (6)$$

$$f = N \cdot FSR = \frac{N}{\Delta\tau} = \frac{Nc}{n_{eff}\Delta L}, \quad (7)$$

$$\Delta t = (D_{F1}L_{F1} + D_{L1}L_{L1} - D_{F2}L_{F2} + D_{L2}L_{L2}) \cdot \Delta\lambda_{FBG}, \quad (8)$$

$$\Delta f = N \cdot \Delta f = N \cdot \left(\frac{1}{\Delta\tau + \Delta t} - \frac{1}{\Delta\tau} \right) \approx - \frac{N(D_{L1}L_{L1} - D_{L2}L_{L2})\Delta\lambda_{FBG}}{\Delta\tau^2}, (\Delta t \ll \Delta\tau, D_F L_F \ll D_L L_L) = -f \cdot FSR \cdot (D_{L1}L_{L1} - D_{L2}L_{L2}) \cdot \Delta\lambda_{FBG}. \quad (9)$$

3 实验结果及分析

本文搭建如图 2 所示 FBG 应变传感系统。宽带光源 (CONNET-VASS-C-Er-B-17-GF) 发出的光波经 Cir 后到达传感 FBG (布拉格反射波长 1 550.01 nm, 反射率 95%), 将 FBG 放置在一对分辨率为 5 μm 的微动台上, 通过对 FBG 施加轴向应变来进行波长调谐。矢量网络分析仪 (Vector Network Analyzer, VNA, Agilent E5061B, 带宽 3 GHz) 发出的扫频微波信号在电

光调制器 (TDKH1.5-10PD-ADC, 带宽为 10 GHz, 半波电压为 6 V, 偏置电压被设置在正交工作点 3.4 V) 中将该信号调制为具有微波包络的光载微波信号, 经分光比为 50:50 的耦合器后到达迈克尔逊干涉仪的两臂, 两臂内反向接入了两个具有相同参数的 LCFBG (中心波长 1 550 nm, 带宽 5 nm, 栅区长度 10 mm)。为了避免干涉仪中发生光学干涉, 将干涉仪的光程差设置为远超宽带光源的相干长度。由 LCFBG 反射回来的光载微波信号在 PD 处进行光电转换后输入 VNA 进行监测。

本文利用相位掩模版技术在载氢标准单模光纤上制作了 4 个 LCFBG, 其中两个带宽为 5 nm, 栅区长度为 10 mm, 色散量分别为 317 ps/nm 和 325 pm/nm; 另外两个带宽为 10 nm, 栅区长度为 10 mm, 色散量分别为 207 ps/nm 和 198 pm/nm。图 3 分别为其中两个 LCFBG 的反射谱和群时延曲线。两个带宽为 5 nm 的 LCFBG 的反射光谱重叠区域约为 4.5 nm, 两个带宽为 10 nm 的 LCFBG 的反射光谱重叠区域为 9.5 nm, 且覆盖 5 nm 带宽 LCFBG 的大部分带宽。因此可以在重叠波长区域内对 FBG 施加轴向应变, 当 FBG 反射波在经过两个相反 LCFBG 后将获得相反的

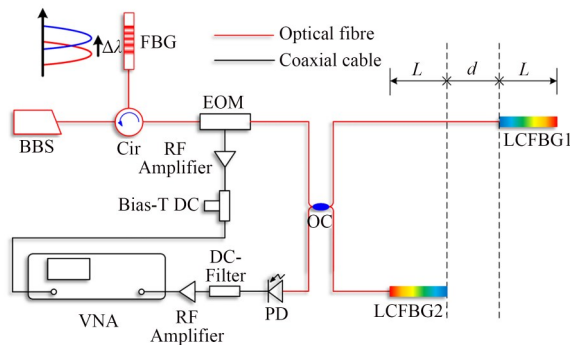


图 2 基于 OCMI 和 LCFBG 色散的 FBG 应变传感系统
Fig. 2 Fiber Bragg Grating Strain Sensing System Based on OCMI and LCFBG Dispersion

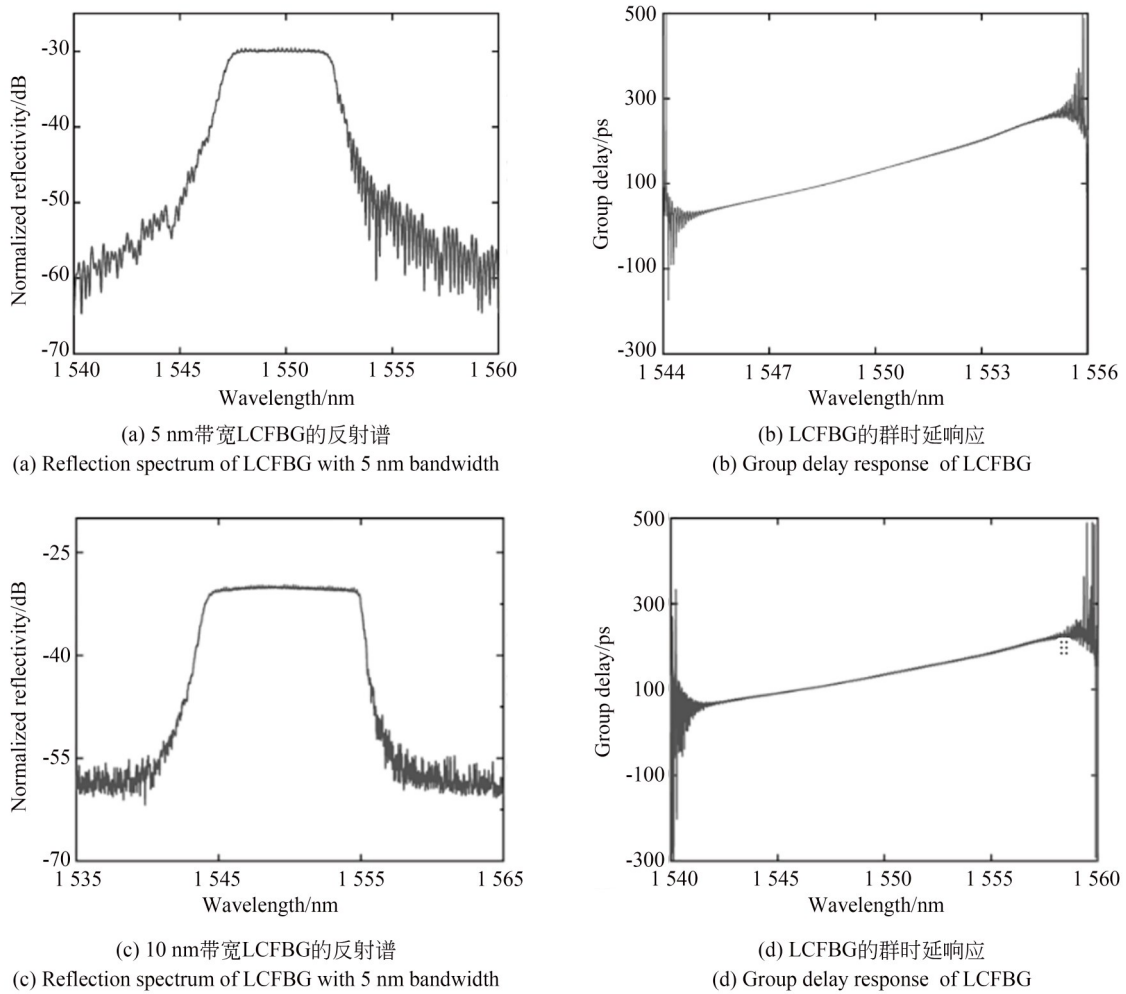


图 3 LCFBG 的反射谱和群延时响应

Fig. 3 Reflection spectrum and group delay response of LCFBG

时延量,从而产生不同的时延差。

实验前,为了消除光相干的影响,且保证最少观测到三阶谐振频率,将两臂光程差设置为 0.5 m。实验过程中,将 EOM 工作电压调节为正交工作点、并归一化 VNA 的前提下,将 VNA 的扫描频率范围设定在 0~3 GHz,采样点数设定为 1 201,使用 VNA 测量了传感 FBG 在 0 $\mu\epsilon$ 、450 $\mu\epsilon$ 及 950 $\mu\epsilon$ 时系统的干涉谱。注意,为了测量准确性应先给 FBG 一个预应变,且施加的总应变不应太大避免 FBG 的反射波长飘出 LCFBG 的带宽范围。

实验结果如图 4 所示,可以发现随着轴向应变不断增大,波谷频率发生了明显蓝移;且选定的参考频率越大,其漂移量越大,意味着传感分辨率越高。因此在后续实验中,我们主要对高频频率漂移进行检测。

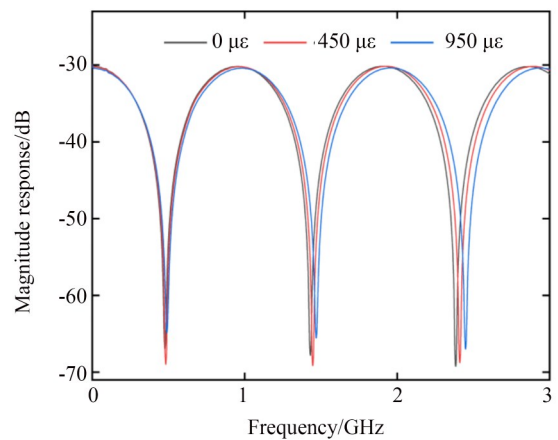


图 4 应变为 0 $\mu\epsilon$ 、450 $\mu\epsilon$ 、950 $\mu\epsilon$ 时的微波干涉谱

Fig. 4 Variation of microwave interference spectrum at axial strain 0 $\mu\epsilon$ 、450 $\mu\epsilon$ 、950 $\mu\epsilon$

将应变步长设置为 $50 \mu\epsilon$, 应变从 $0 \mu\epsilon$ 逐渐增大到 $950 \mu\epsilon$, 使用 VNA 测量了参考频率为 2.5 GHz 附近的微波干涉波谷漂移, 如图 5(a) 所示。图 5(b) 显示了应变大小与参考频率漂移量的拟合结果及回复性测量拟合结果。结果显示该测量系统能够实现 FBG 应变量的解调, 其拟合灵敏度约为 $44 \text{ kHz}/\mu\epsilon$, 其线性度为 0.99 。其回复性曲线的灵敏度和线性度与测量曲线基本相同, 证明测量系统的重复性较好, 可广泛应用于高灵敏度、高重复性测量领域。为了进一步验

证参考频率大小与系统分辨率之间的关系, 分别选取 0.5 GHz , 1.5 GHz 及 2.5 GHz 为参考频率, 当应变逐渐增大时, 测得的对应曲线如图 5(c) 所示, 其灵敏度分别为 $8.93 \text{ kHz}/\mu\epsilon$, $27.23 \text{ kHz}/\mu\epsilon$ 和 $43.75 \text{ kHz}/\mu\epsilon$, 其拟合曲线的线性度分别为 0.98 , 0.99 和 0.99 。实验结果表明该测量系统线性度好。图 5(c) 中的实验结果进一步说明了高阶谐振频率可以累积更多的时延, 在等量的应变下, 高阶谐振频率获得更大的漂移, 这意味着传感系统的分辨率越高。

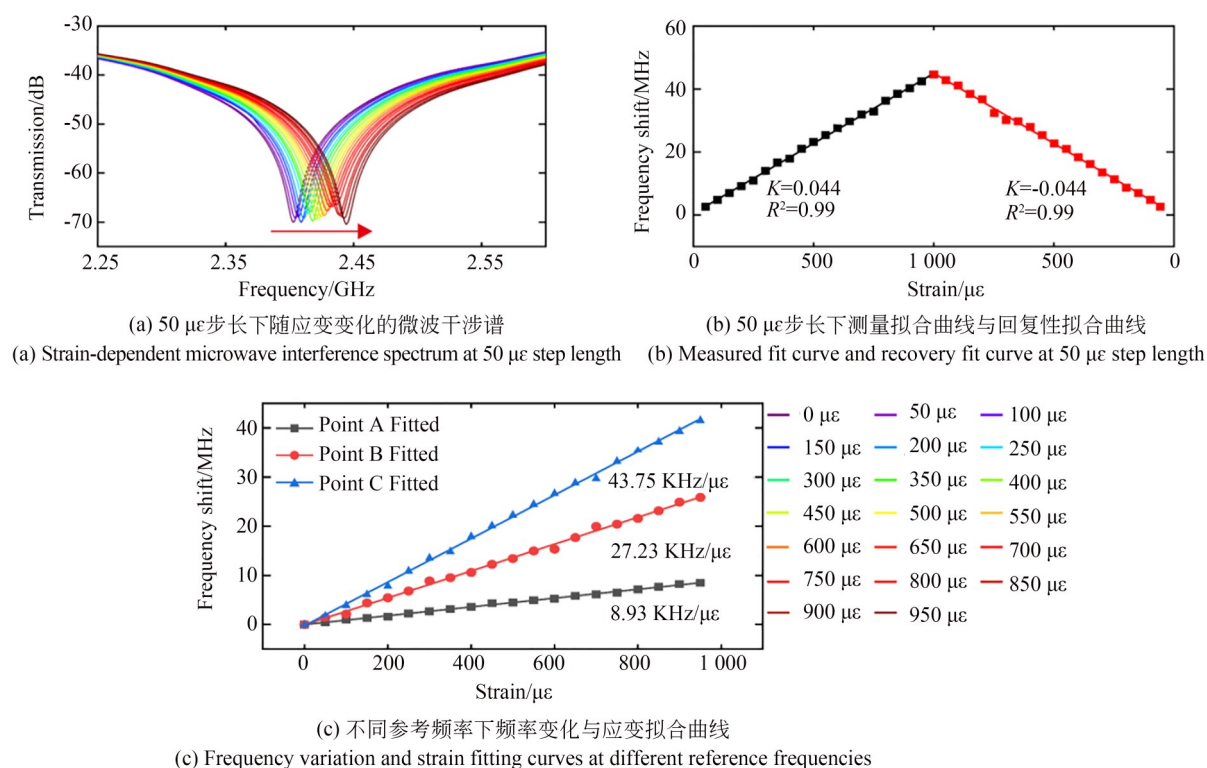
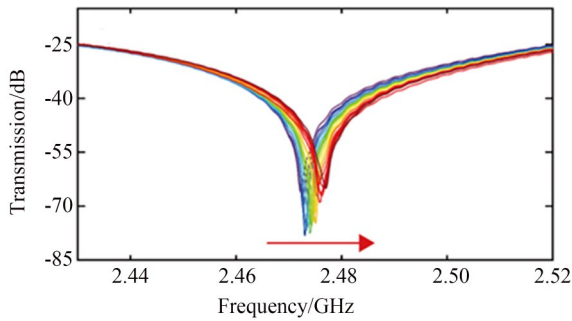


图 5 $50 \mu\epsilon$ 步长下微波干涉谱漂移及拟合曲线

Fig. 5 Microwave interference spectrum drift and fitting curve at $50 \mu\epsilon$ step length

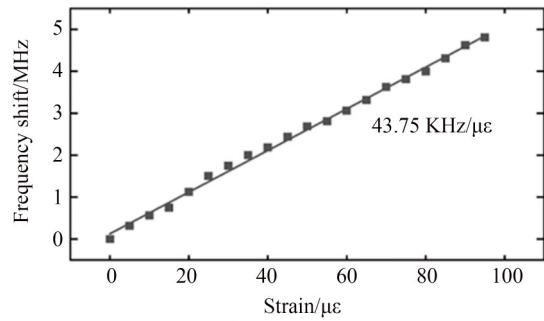
由于光谱解调受限于光谱仪的精度, 因此本文进一步探究了该应变传感系统的测量极限。将 VNA 的扫描频率范围设置为 $2.350 \sim 2.525 \text{ GHz}$, 采样点数设置为 1201 , 分辨率设置为 100 Hz ; 设置应变步长为 $5 \mu\epsilon$, 当应变从 $0 \mu\epsilon$ 逐渐增大到 $95 \mu\epsilon$, 其频率漂移如图 6(a) 所示, 其拟合曲线图为图 6(b), 可以看出虽然应变步长缩小, 但 VNA 仍能良好地分辨出光栅轴向应变引起的参考频率漂移, 且分辨率与大应变测量分辨率一样, 证明其真实性。而根据文献 [21] 所

知, 在 1550 nm 附近, FBG 的轴向应变灵敏度为 $1.21 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $5 \mu\epsilon$ 步长所对应的 FBG 波长漂移步长为 6.05 pm , 这远小于光谱仪的最小分辨率 20 pm 。因此, 本文所提出的 FBG 应变传感系统相比于光谱解调, 其价格更低、分辨率也更高。图中监测的波谷在频率发生漂移的同时, 对比度也会变化, 其原因是由于 LCFBG 的反射光谱不完全平坦使得迈克尔逊干涉仪两臂的光强比发生变化进而影响干涉谱对比度, 通过制作性能更好的 LCFBG 可以进一步优化结果。



(a) 5 με步长下随应变变化的微波干涉谱

(a) Strain-dependent microwave interference spectrum at 5 με step length



(b) 5 με步长下频率与应变的测量拟合曲线

(b) Measured fit curve at 5 με step length

图 6 5 με步长下微波干涉谱漂移及拟合曲线

Fig. 6 Microwave interference spectrum drift and fitting curve at 5 με step length

之后,本文还研究了不同色散 LCFBG 下传感系统的性能。为了方便起见,以光栅的 FWHM 代表不同的 LCFBG。实验中分别选择 5 nm-5 nm, 5 nm-10 nm, 5 nm-R, 10 nm-10 nm 和 10 nm-R 的 LCFBG 组合(其中 R 代表菲涅尔反射镜)以相反方向接入系统。在实验过程中保持 OCMI 的 FSR 一致,以减少 FSR 对测量灵敏度的影响。对参考频率为 2.4 GHz 附近的波谷频率进行检测,不同组合 LCFBG 的系统参考频率变化与轴向应变的拟合曲线如图 7 所示。其中,使用 5 nm-5 nm 带宽的 LCFBG 的测量灵敏度为 43.75 kHz/με,线性度为 0.99;使用 5 nm-10 nm 带宽的 LCFBG 的测量灵敏度为 29.86 kHz/με,线性度为 0.99;使用 5 nm-R 带宽的 LCFBG 的测量灵敏度为

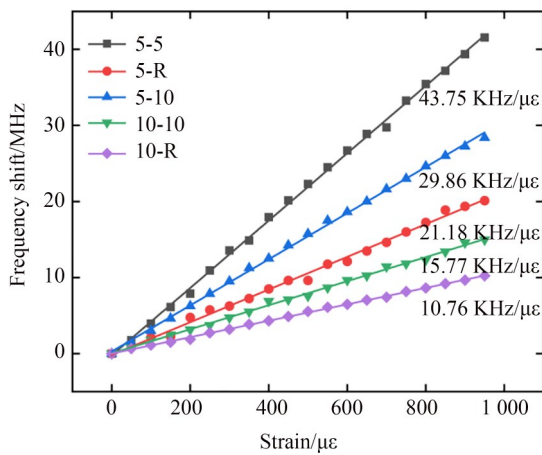


图 7 使用不同组合 LCFBG 的测试结果与应变的拟合曲线

Fig. 7 Test results of different combinations of LCFBG are fitted to the strain curve

21.18 kHz/με,线性度为 0.99;使用 10 nm-10 nm 带宽的 LCFBG 的测量灵敏度为 15.77 kHz/με,线性度为 0.99;使用 10 nm-R 带宽的 LCFBG 的测量灵敏度为 10.76 kHz/με,线性度为 0.99。图 8 所示为将两个 LCFBG 都换成菲涅尔反射镜,其测量灵敏度为 1.04 kHz/με,线性度为 0.98,所得最高灵敏度是其 42 倍。从上述结果可以看出由于 LCFBG 以相反方向接入两臂,使其提供相反色散,其灵敏度相比使用菲涅尔反射镜显著提升;且使用色散量更大的 LCFBG 可以提高系统的测量灵敏度。此外,使用更大色散量的 LCFBG 来增大时延量可以极大地提高系统的灵敏度。然而这会牺牲 LCFBG 的带宽,即应变传感系统的测量范围变小。因此,在实际应用中,需要根据需求选择 LCFBG 的带宽和色散量来平衡测量范围与测量灵敏度之间的关系。

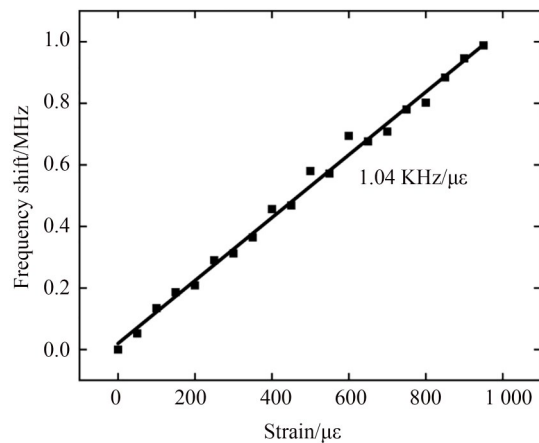


图 8 无 LCFBG 的光载微波干涉应变-频率拟合曲线

Fig. 8 Strain-frequency fitting curve of optical microwave interference without LCFBG

此外,本文对FBG应变传感系统进行了稳定性测试如图9所示。在不施加应变的条件下,每5 min测量上述系统选定频率的频率数据,在2.5 h内依次记录15次。将VNA的扫描频率范围设置为2.25~2.70 GHz;采样点数被设置为1 201个;分辨率设置为100 Hz。从图9中可以看出在不同的LCFBG组合的应变传感实验中,选定频率的频率抖动比较稳定,其最大频率抖动为0.15 MHz,这说明本文设计的FBG应变传感系统具有非常好的稳定性,具有应用到多个领域的潜力。为了更清楚地证明这项工作的性能,我们

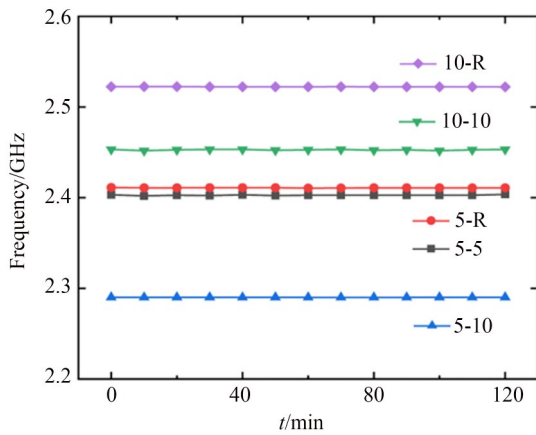


图9 测量参考频率随测量时间的变化

Fig. 9 Change of the measurement reference frequency with the measurement time

参考文献:

- [1] 李天梁,宋珍珍,陈发银,等. 光纤光栅与人工智能融合的形状自感知穿刺针[J]. 光学精密工程, 2023, 31(2): 160-167.
LI T L, SONG Z Z, CHEN F Y. Fiber Bragg grating and artificial intelligence fusion for shape self-sensing puncture needle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(2): 160-167. (in Chinese)
- [2] 孙晓,王清梅,李振伟,等. 结构健康监测系统中光纤Bragg光栅应变计异常诊断[J]. 光学精密工程, 2021, 11(29): 1-9.
SUN X, WANG Q M, LI Z W. Abnormal diagnosis of fiber Bragg grating strain gauges in health monitoring system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 11(29): 1-9. (in Chinese)
- [3] LIU Q, TOKUNAGA T, HE Z. Sub-nano resolution fiber-optic static strain sensor using a sideband

的方案与最近报道的其他方案的传感性能的比较如表1所示。与其他工作相比,所提出的传感方案在灵敏度和分辨率方面有了更显著的提高,对精密测量领域起到了指导作用。

表1 这项工作与其他工作对比

系统类型	灵敏度	灵敏度增强方式	文献
OCMI	33.862 kHz/ $\mu\epsilon$	游标效应	[12]
OCMI	38.695 kHz/ $\mu\epsilon$	游标效应	[22]
OCMI	0.00835 a. u. / $\mu\epsilon$	色散增强	[11]
OEO	100 Hz/ $\mu\epsilon$	无	[23]
OEO	11 kHz/ $\mu\epsilon$	游标效应	[24]
OCMI	43.75 kHz/ $\mu\epsilon$	色散增强	本文

4 结 论

本文设计了一种基于色散增强的OCMI应变测量系统,利用反向接入LCFBG提供相反色散量的特点从而极大地提高了系统的灵敏度。实验结果表明,LCFBG的色散量越大,系统的灵敏度越大。OCMI应变传感系统的灵敏度最大可达43.75 kHz/ $\mu\epsilon$,是无LCFBG系统灵敏度的42倍。该应变测量系统具有灵敏度高、高稳定性和抗干扰性等优点,为弱应变测量领域提供测量方法。

- interrogation technique[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(3): 434-436.
- [4] PENG P C, TENG H Y, CHI S. Long-distance FBG sensor system using a linear-cavity fiber Raman laser scheme[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(2): 575-577.
- [5] XU H, CHEN S, REN S, HOU X, WANG G. Dual-parameter demodulation of fbg-fpi cascade sensors via sparse samples: a deep learning-based perspective[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(19): 23903-23915.
- [6] YAO J P. Microwave Photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [7] WANG Y P, WANG M, XIA W. Optical fiber bragg grating pressure sensor based on dual-frequency optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(21): 1864-1867.
- [8] RICCHIUTI A L, BARRERA D, SALES S.

- Long fiber Bragg grating sensor interrogation using discrete-time microwave photonic filtering techniques [J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28175-28181.
- [9] XU O, ZHANG J J, YAO J P. High speed and high resolution interrogation of a fiber Bragg grating sensor based on microwave photonic filtering and chirped microwave pulse compression [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 4859-4862.
- [10] YAO J P. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber bragg grating sensors[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2015, 34(4): 204-216.
- [11] ZHOU J A, XIA L, CHENG R. Radio-frequency unbalanced M - Z interferometer for wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2):313-316.
- [12] XIAO Y H, WANG Y P, SHI J Z. Temperature-insensitive and sensitivity-enhanced FBG strain sensor by using parallel MPF [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(15): 809-812.
- [13] ZHU C, LL R E G, HUANG J. Ultra-sensitive microwave-photonic optical fiber interferometry based on phase-shift amplification[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(6): 1-8.
- [14] RICCHIUTI A L, HERVAS J, SALES S. Cascade FBGs distributed sensors interrogation using microwave photonics filtering techniques [J]. *Optics and Laser Technology*, 2016, 77: 144-150.
- [15] CHENG R, XIA L, YAN J, ZHOU J. Radio frequency FBG-Based interferometer for remote adaptive strain monitoring [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(15): 1577-1580.
- [16] ZHOU J, XIA L, CHENG R, WEN Y. Radio-frequency unbalanced M-Z interferometer for wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 313-316.
- [17] HUA L, SONG Y, HUANG J, LAN X, LI Y. Microwave interrogated large core fused silica fiber Michelson interferometer for strain sensing[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(24): 7181-7187.
- [18] PENG P C, YE H S K, WU F M, et al. Tunable photonic microwave filter using slow light in vertical cavity surface emitting laser[C]. *IEEE. Conference on Optical Fiber Communication-includes Post Deadline Papers*, 2009:1-3.
- [19] HERVAS J, FERNANDE C R, BARRERA D, D. An interrogation technique of FBG cascade sensors using wavelength to radio-frequency delay mapping [J]. *Journal Of Lightwave Technology*, 2015, 33(11): 2222-2227.
- [20] ZENG F, PING J. Investigation of phase-modulator-based all-optical bandpass microwave filter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(4): 1721-1728.
- [21] LI S D, HE W, TAN Q M. High temperature and strain dual-parameters fiber sensing based on intermodal interference and femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating [J]. *Physica Scripta*, 2023, 98(5):055505.
- [22] XIAO Y H, WANG Y P, ZHU D. Low cross-sensitivity and sensitivity-enhanced FBG sensor interrogated by an OCMI-based three-arm interferometer [J]. *Optics Express*, 2023, 31(9): 14119-14127.
- [23] XU Z W, SHU X W, FU H Y. Fiber Bragg grating sensor interrogation system based on an optoelectronic oscillator loop [J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 23274-23281.
- [24] TIAN X Z, SHI J Z, WANG Y P. Sensitivity enhancement for fiber bragg grating strain sensing based on optoelectronic oscillator with vernier effect [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(6): 1-6.

作者简介:



王天祺(1997—),男,甘肃天水人,博士研究生。2019年于浙江工业大学获得学士学位,2022年于西北大学获得硕士学位。主要研究光纤传感技术、微波光子技术。E-mail:20220801009@stu.cqu.edu.cn

通讯作者:



邓明(1979—),女,陕西咸阳人,博士,教授,博士生导师。2009年于重庆大学获得博士学位。研究方向包括微纳光电子器件及系统、光纤传感技术、光学精密测量技术、微波光子传感技术等。E-mail:dengming@cqu.edu.cn