

引用本文: 周自强, 王旭, 王善进, 等. 基于 FP-LD 强反馈的光纤迈克尔逊干涉仪传感系统[J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 34-38.

基于 FP-LD 强反馈的光纤迈克尔逊干涉仪传感系统

周自强, 王旭, 王善进, 王芳

(河南师范大学 电子与电气工程学院, 河南 新乡 453000)

摘要: 针对采用传统自组光纤激光器的光纤传感系统存在成本较高和结构复杂等问题, 提出了一种基于商用激光器强反馈的光纤迈克尔逊干涉仪(FMI)传感解调系统。该系统采用商用法布里-珀罗腔型半导体激光器(FP-LD)为光源, 由直流电源直接驱动, 经 FMI 的反射、干涉后对其形成强反馈; 利用多纵模激光拍频解调技术实现对 FMI 的传感解调, 将 FMI 光域干涉光强的变化直接转化为电域拍频包络的变化。研究了不同 FMI 臂长差时拍频信号随温度的变化过程及传感系统灵敏度。实验结果表明: 当臂长差分别为 0.45、0.40 m 时, 灵敏度分别为 325、358.33 kHz/°C。

关键词: 半导体激光器; 光纤迈克尔逊干涉仪; 多纵模激光拍频解调技术; 温度传感

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)02-0034-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.02.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical fiber Michelson interferometer sensing system based on FP-LD strong feedback

ZHOU Ziqiang, WANG Xu, WANG Shanjin, WANG Fang

(School of Electronics and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxian Henan 453000, China)

Abstract: Aiming at the problems of high cost and complex structure of optical fiber sensing systems using traditional self organizing fiber lasers, a optical fiber Michelson interferometer(FMI) sensing demodulation system based on the strong feedback of a commercial laser is proposed. The system adopts a commercial Fabry-Perot cavity semiconductor laser diode(FP-LD) as the light source, directly driven by direct-current power supply, and form strong feedback on the FMI after reflection and interference. Multi-longitudinal mode laser beat frequency demodulation technology is used to realize the sensing demodulation of FMI. The change of FMI optical domain interference light intensity is directly converted into the change of electric domain beat frequency envelope. The change process of beat frequency signal with temperature and the sensitivity of sensing system with different FMI arm length difference are studied. The experimental results show that when the arm length difference is 0.45 m and 0.40 m, the sensitivity is 325 kHz/°C and 358.33 kHz/°C respectively.

Key words: semiconductor laser, optical fiber Michelson interferometer, multi-longitudinal mode laser beat frequency demodulation technology, temperature sensing

0 引言

光纤迈克尔逊干涉仪(FMI)具有成本低、灵敏度高、结构简单、抗电磁干扰和多参数传感等优点, 在工业、能源、建筑、电力等领域得到了广泛的应用^[1-3]。传

收稿日期: 2022-10-15。

收稿日期: 国家自然科学基金项目(批准号: 62075057、62075058)资助。

作者简介: 周自强(1997—), 男, 河南师范大学电子与电气工程学院硕士研究生, 主要从事光纤通信与传感方面的研究。参与的项目有光纤分布式多点传感、光纤电流传感、电路微弱信号检测等。获得的奖项有硕博论坛三等奖、创意电路设计大赛二等奖等。



统 FMI 通过在光域检测干涉光强的变化来实现传感解调^[4-5], 该解调方法虽然灵敏度高, 但检测信号易受光源波动的影响, 抗干扰能力较弱。2022 年, 本实验室^[6]提出了一种基于多纵模激光拍频解调的 FMI 传感方案, 该方案将传感量的变化转化为激光拍频频率的变化, 通过对激光拍频频率的测量实现 FMI 的传感解调。这种频域的解调方法具有稳定性好、抗干扰能力强的优点, 但该方案采用自制的光纤激光器^[7-8]作为光源, 增加了系统的成本和复杂性, 不易于光纤传感技术进一步商业化。分布反馈式(DFB)激光器和法布里-珀罗腔型半导体激光器(FP-LD)是光通信系统中常见的 2 种光源。DFB 激光器主要应用于高速光通信系统

中, 由于它具有窄线宽的激光输出, 因此需要较长的谐振腔来产生可以检测的拍频信号。FP-LD 在低速光纤通信网络和视频监控网络中的应用较为普遍, 它的激光线宽较宽并具有多纵模的输出特性, 在强反馈时易形成谐振, 适用于激光拍频解调光纤传感系统, 而且其宽光谱激光输出特性使其能够产生高稳定度的激光拍频信号。基于此, 本文提出一种基于 FP-LD 强反馈的 FMI 传感系统。

1 FMI 传感系统的结构和原理

基于 FP-LD 强反馈的 FMI 传感系统结构图如图 1 所示, 该系统由 3 部分构成, 分别是光源部分、传感部分和检测部分。其中, 光源部分为 FP-LD, 由直流电源直接驱动; 传感部分为 FMI, 由 2 个法拉第旋转反射镜 (FRM) 和一个 50:50 光耦合器 (OC) 组成, 可以对光源形成强反馈。检测部分中, 光电探测器 (PD) 将光信号转变为电信号, 频谱分析仪 (RFSA) 被用来测量拍频信号的频率变化。在该结构中, FRM 用于控制光的偏振状态来获得更好的干涉效应, 光隔离器 (ISO) 用于防止 PD 的端面反射对系统产生干扰。

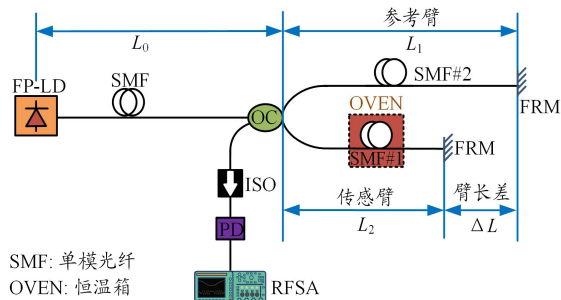
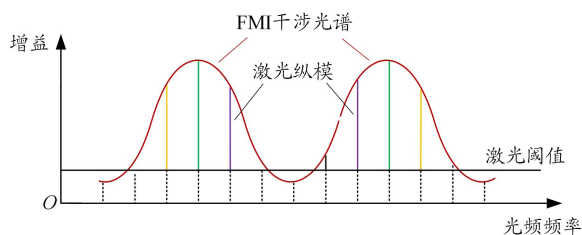


图 1 基于 FP-LD 强反馈的 FMI 传感系统结构图

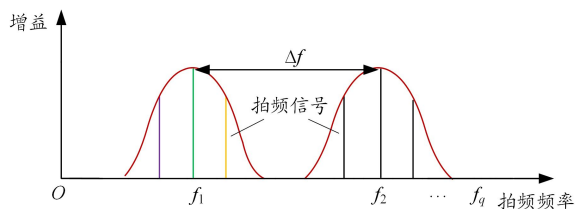
FP-LD 的激光输出经 FMI 反射、干涉后对 FP-LD 形成强反馈。FMI 生成与两臂光程差相关的干涉光谱, 对激光纵模产生相应的光谱调制, 如图 2(a) 所示。拍频信号由超过阈值的任意 2 个激光纵模之间相互外差产生, 拍频信号频率取决于 FMI 的干涉光谱, 其拍频频谱如图 2(b) 所示。通过检测拍频信号的频率, 可以得到 FMI 干涉光谱的变化, 从而实现传感解调。在强反馈过程中形成的拍频包络中心频率^[9]为

$$f_q = q \cdot \frac{c}{2 \cdot n \cdot \Delta L} \quad (1)$$

其中, q 是正整数, c 是光在真空中的速度, n 是光纤的有效折射率, ΔL 是 FMI 两臂的臂长差。任意 2 个相邻拍频信号的差频可用 Δf 表示为



(a) FMI 的干涉光谱对激光纵模形成的包络光谱调制



(b) 拍频信号频谱

图 2 经 FMI 干涉谱调制的激光纵模和拍频信号频谱

$$\Delta f = f_{q+1} - f_q = \frac{c}{2 \cdot n \cdot \Delta L} \quad (2)$$

本文以温度传感为例验证所提传感系统的技术可行性。具体操作如下: 采用恒温箱对传感臂进行加热, 改变传感光纤的长度和折射率, 通过频谱分析仪对拍频信号进行测量, 根据拍频信号的中心频率与温度的对应关系实现对温度的测量。拍频信号中心频率的变化量 Δf_q 与 FMI 传感臂温度变化的关系为

$$\Delta f_q = f_q \cdot \frac{L_2}{\Delta L} (a + \varepsilon) \cdot \Delta T \quad (3)$$

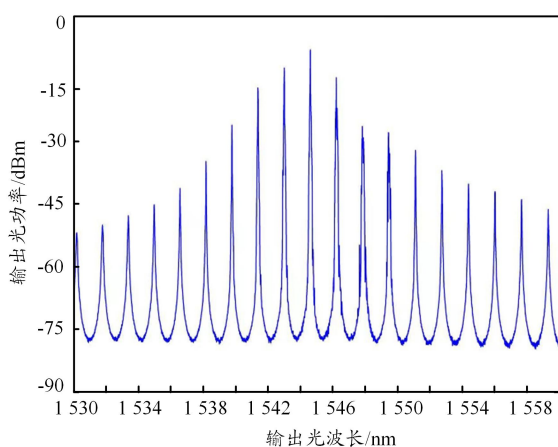
其中, L_2 是 FMI 传感臂的长度, a 是热膨胀系数, ε 是热光系数, ΔT 是温度的变化量。不同材料的光纤具有不同的热响应系数, SMF 的主要成分为二氧化硅, 因此 SMF 的热响应系数可以表示为

$$a + \varepsilon = 7.1 \times 10^{-6} / (^\circ\text{C} \cdot \text{m}) \quad (4)$$

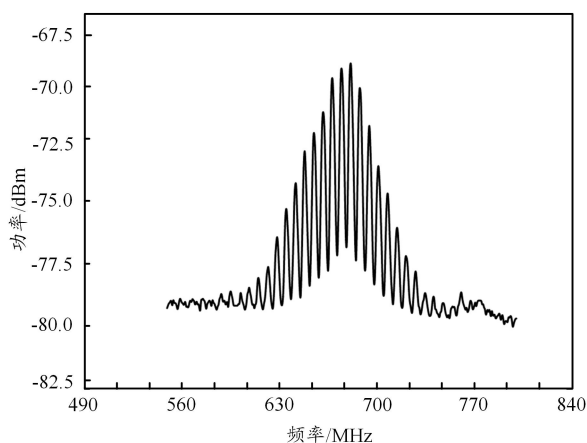
2 实验结果分析

本文按图 1 搭建实验系统, 系统中 FP-LD 工作的阈值电流为 10 mA, 最大电流为 40 mA。当工作电流略大于阈值时, 系统易受振荡衰减和噪声的影响; 当工作电流大于最大值时, 半导体激光器会受到损伤。在本实验中, 设置 FP-LD 的工作电流为 30 mA, FP-LD 与 OC 之间的光纤长度为 2 m。在 OC 的输出端口连接一个 ISO, 以确保激光的单向传输。由多纵模形成的拍频信号通过 PD 检测并在 RFSA 上显示。为了消除噪声干扰, 本文采用 RFSA 的平均模式对拍频信号进行平均。

周自强, 王旭, 王善进, 等: 基于 FP-LD 强反馈的光纤迈克尔逊干涉仪传感系统



(a) FP-LD 的激光输出光谱

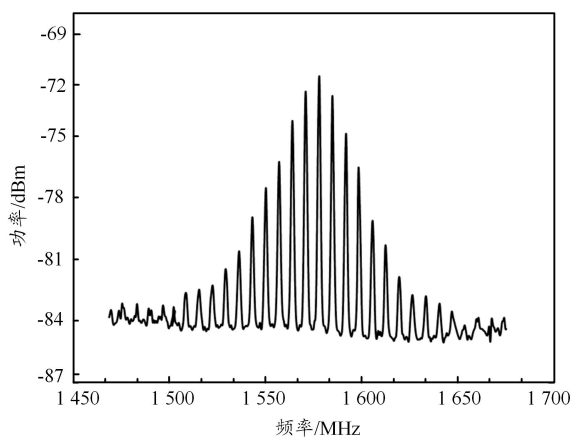


(b) 中心频率为 596 MHz 时的拍频信号

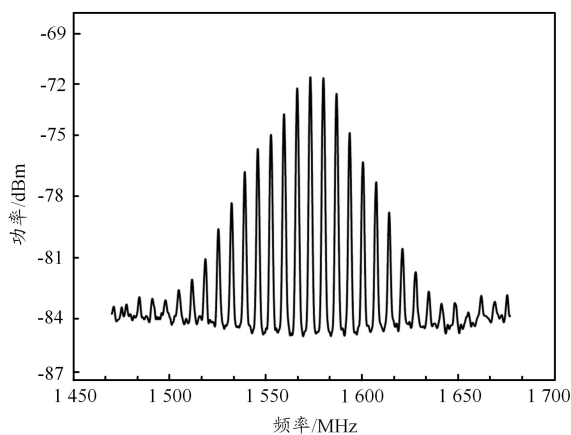
图 3 激光输出光谱和拍频信号图

FP-LD 的激光输出光谱如图 3(a) 所示, FP-LD 的纵模间隔约为 1.2 nm (150 GHz), 频谱宽度为 30 nm。由于温度是一个缓变信号, 采用数字平均频率测量的方式可以有效抑制快变信号 (如振动) 对系统产生的干扰。图 3(b) 为经过数字平均、频谱宽度设置为 250 MHz、中心频率为 596 MHz 时, 实验系统在室内条件下的拍频信号图。

为了研究臂长差对拍频信号中心频率的影响, 本文设频谱宽度为 200 MHz, FMI 的臂长差分别为 0.45 m 和 0.4 m, 得到的拍频信号如图 4 所示。可以看出, FMI 臂长差为 0.45 m 时的包络峰值频率为 1 579 MHz; FMI 臂长差为 0.4 m 时的包络峰值频率为 1 583 MHz。分别选取图 4 中的 2 个拍频信号作为观测频率进行温度传感实验。SMF#1 作为传感臂被固定在恒温箱中, 2 组实验的传感臂长度相同。除暴露在恒温箱外部的光纤外, 实验中 FMI 传感臂的光纤加热长度约为 16 m。光纤的热膨胀导致参考臂长度增加。由于传感臂长度



(a) FMI 的臂长差为 0.45 m



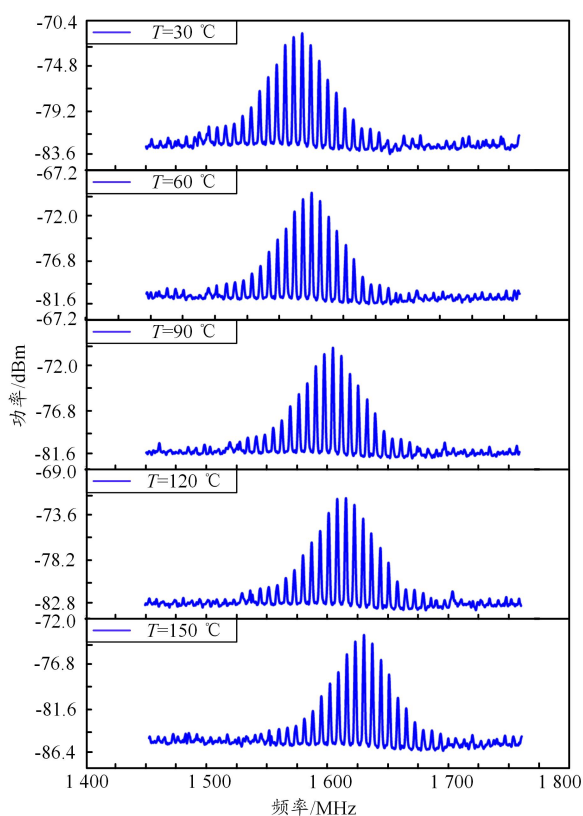
(b) FMI 的臂长差为 0.4 m

图 4 不同臂长差时的拍频信号

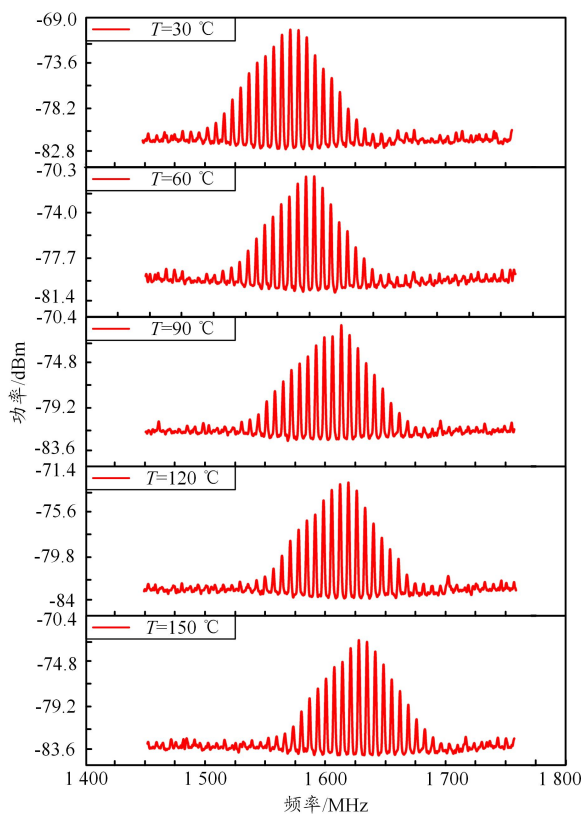
小于参考臂, 臂长差减小。由式(3)可知, 臂长差减少会引起拍频信号频率增大。在频谱仪上可以明显观测到, 随着温度的升高, 拍频信号向高频移动。另外, 为了保证实验的准确性, 在保存数据前应保持温度 5 min 不变。

FMI 臂长差为 0.45 m, 中心频率为 1 579 MHz 时的拍频信号随温度的移动过程如图 5(a) 所示。可以看出, 随着温度从 30 °C 增加到 150 °C, 拍频信号的中心频率从 1 579 MHz 移动到 1 618 MHz。为了进一步提升系统的灵敏度, 设置 FMI 臂长差为 0.4 m, 当中心频率为 1 583 MHz 时, 拍频信号随温度的移动过程如图 5(b) 所示。可以看出, 随着温度从 30 °C 增加到 150 °C, 拍频信号的中心频率从 1 583 MHz 移动到 1 626 MHz。

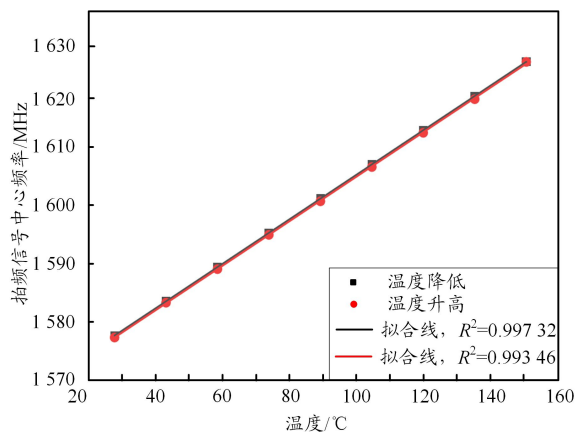
温度升高至 150 °C 后, 以同样的步长降至 30 °C, 得到拍频信号的中心频率与温度的对应关系如图 6 所示。可以看出, 温度升高和降低时的线性拟合线基本相同。在 FMI 的臂长差为 0.45 m, 中心频率为 1 579 MHz



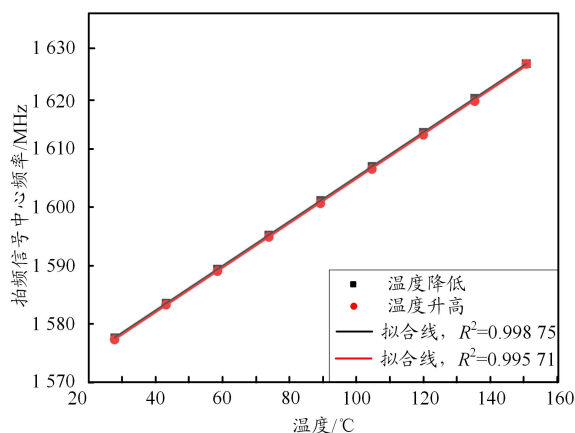
(a) FMI 的臂长差为 0.45 m



(b) FMI 的臂长差为 0.4 m

图 5 不同臂长差时拍频信号随温度 (T) 的变化过程

(a) 臂长差为 0.45 m



(b) 臂长差为 0.4 m

图 6 拍频信号中心频率与温度的关系

的拍频信号频率随温度上升和下降的变化过程中,线性拟合的斜率(灵敏度)为 325 kHz/°C,拟合度 R^2 分别为 99.732%和 99.346%。在 FMI 的臂长差为 0.4 m,中心频率为 1 583 MHz 的拍频信号随温度上升和下降的变化过程中,线性拟合的斜率(灵敏度)是 358.33 kHz/°C,拟合度 R^2 分别为 99.875%和 99.571%。与其它拍频传感系统和直接反馈相比^[10-11],采用 FMI 可以有效提高温度的检测灵敏度。通过实验可知,当 FMI 的臂长差较小时,拍频信号中心频率的变化量会显著增加。虽然臂长差减小会使传感系统的灵敏度提高,但拍频信号的边频抑制降低,包络会变得平缓。因此,臂长差需要根据测量灵敏度要求选择一个合理的数值。

3 结束语

本文提出了一种基于 FP-LD 强反馈的 FMI 传感系统,通过检测拍频信号的频率实现了温度的传感解调。与传统的光纤温度传感系统相比,该系统采用 FP-

周自强,王旭,王善进,等:基于 FP-LD 强反馈的光纤迈克尔逊干涉仪传感系统

LD 为系统光源,同时为强反馈提供增益,无需泵浦源和增益光纤等构建光纤激光器,从而大幅降低了光纤传感系统的成本和复杂性;同时,该系统使用 FMI 对温度进行传感实验,与常用非复合腔传感系统相比,传感灵敏性得到了大幅提升。实验结果表明所提出的传感系统具有较高的传感灵敏度,为光纤传感技术提供了一种新的结构简单、成本低、具有良好实用性的技术方案。

参考文献:

- [1] 李永超,温晓东,谭竣耀,等. 基于迈克尔逊干涉仪的光纤微流速传感器[J]. 光学技术,2019,45(3):303-309.
- [2] WANG J, PENG H, ZHOU P, et al. Sound source localization based on Michelson fiber optic interferometer array [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 51: 112-117.
- [3] SUN X, GONG H, XIE M, et al. All-fiber humidity sensor based on Michelson interferometer with hyaluronic acid and polyvinyl alcohol composite film [J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60: 102381-1 - 102381-6.
- [4] SHAO M, SUN H, LIANG J, et al. In-fiber Michelson interferometer in photonic crystal fiber for humidity measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(2): 1561-1567.
- [5] SHAO M, ZHANG R, ZHAO X, et al. Dual-core fiber based in-line Michelson interferometer for humidity sensing [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 64: 102570-1-102570-6.
- [6] WANG X, WANG E, WANG F. Michelson interferometer composite cavity fiber laser sensor with radio frequency interrogation [J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(4): 40603-1-40603-5.
- [7] GUO Y, LIU S, NI Y, et al. Multi-longitudinal mode fiber laser sensor system with high signal-to-noise ratio based on laser modes control [J]. Optics Express, 2019, 27(8): 11776-11782.
- [8] GUO Y, NI Y, WU H, et al. FBG wavelength demodulation based on bandwidth of radio frequency signals [J]. Optics Communications, 2020, 454: 124478-1-124478-5.
- [9] WANG X, WANG L, WANG J, et al. High sensitivity interrogation system of fiber Bragg grating sensor with composite cavity fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142: 107228-1-107228-6.
- [10] TONG X, SHEN Y, MAO X, et al. Fiber-optic temperature sensor based on beat frequency and neural network algorithm [J]. Optical Fiber Technology, 2022, 68: 102783-1-102783-7.
- [11] WANG X, WANG S, ZHOU Z, et al. Fiber-optic temperature sensor based on fabry-perot laser diode strong feedback [J]. Optical Fiber Technology, 2022, 73: 103021-1-103021-7.