

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.05.011

基于磁流体包覆 SNCS 结构的光纤磁场传感系统设计

石嘉^{1,2}, 周鹏^{1,2}, 郭翠娟^{1,2}, 王少娜^{1,2}, 赵子豪^{1,2}

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387)

摘要: 为实现磁场微小变化的高分辨率测量, 设计了一种基于磁流体包覆单模-无芯-单模(SNCS)结构的光纤磁场传感系统, 将单模-无芯-单模(SNCS)干涉结构封装在装满磁流体的毛细管中作为磁场传感结构接入光纤环形激光器后, 采用强度解调技术实现高分辨率的磁场测量, 并对该系统的温度交叉敏感特性和稳定性进行实验验证。结果表明: 该系统结构简单、输出稳定、温度交叉敏感低; 与同一结构的波长解调系统相比, 磁场分辨率由 1.00 mT 提升到 0.05 mT, 可实现磁场的高分辨率测量; 温度交叉灵敏度为 0.484 $\mu\text{W}/^\circ\text{C}$, 输出测量误差小于 0.008%, 有望应用于电力工业、航空航天研究等领域。

关键词: 磁流体传感器; 磁场传感系统; 磁场分辨率; 温度交叉敏感性

中图分类号: TM937

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)05-0072-06

Design of fiber optic magnetic field sensing system based on magnetic fluid-encapsulated SNCS structure

SHI Jia^{1,2}, ZHOU Peng^{1,2}, GUO Cuijuan^{1,2}, WANG Shaona^{1,2}, ZHAO Zihao^{1,2}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to achieve high-resolution measurement of minute changes in magnetic fields, an optical fiber magnetic field sensing system is designed based on a magnetofluid-clad single-mode-no-core-single-mode (SNCS) structure. In this sensing system, the SNCS interference structure is encapsulated in a capillary filled with magnetofluid and connected to an optical fiber ring laser, then the magnetic field measurement with high-resolution is realized by employing intensity demodulation techniques. The temperature cross-sensitivity and stability of the system are experimentally validated. The results show that the system features a simple structure, stable output, and low temperature cross-sensitivity. Compared with the wavelength demodulation system of the same structure, the magnetic field resolution of the designed system is enhanced from 1.00 mT to 0.05 mT, enabling high-resolution magnetic field measurement. The temperature cross-sensitivity of this system is 0.484 $\mu\text{W}/^\circ\text{C}$, and the output measurement error is less than 0.008%. It is expected to be applied in fields such as the power industry and aerospace research.

Key words: magnetic fluid sensor; magnetic field sensing system; magnetic field resolution; temperature cross-sensitivity

磁场是由磁性物体所产生或磁性物体之间相互作用所引起的一种物理现象。磁场传感技术可用于检测磁场的变化, 将其转化为更加直观的视觉信息进行观察和分析。随着传感器技术向小型化、自适应、多

模态、无线通讯等方向发展, 基于电信号的磁场传感器所存在的体积大、结构复杂、适应性弱等缺点愈加明显^[1], 而且在实际磁场传感应用中, 该传感器会受到电磁环境的干扰引入噪声, 影响磁场传感的准确性。

收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(62101518); 天津市自然科学基金项目(19JCQNJC01400, 18JCQNJC70600)

通信作者: 石嘉(1990—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为大赫兹及微波光子学、光纤传感与光谱检测、人工智能赋能光电电子技术。E-mail: shijia@tiangong.edu.cn

光纤磁场传感技术由于其自身优势,不受上述缺陷的影响,更适合于磁场传感^[2-3]。磁流体作为人造纳米功能材料具有磁光效应,其微观结构可通过磁场来进行调控,其光学特性已广泛应用于光调制器件、显示技术等领域^[4]。磁流体具有流动性,与光纤结构结合置于磁场环境后,磁流体受磁场影响流动引起光纤的参数变化,进而实现对磁场的测量^[5];磁流体光纤磁场传感器灵敏度高,稳定性好,结构简单,便于制备并且可根据需求进行定制。磁流体能与各种光纤传感结构结合进行磁场传感,例如多模干涉(MMI)、马赫-曾德尔干涉(MZI)^[6-8]、法布里-珀罗干涉(FP)^[9-10]、萨格纳克干涉(Sagnac)^[11]、光纤布拉格光栅(FBG)^[12]等。基于 MZI 的磁场强度传感器灵敏度低且制作方法复杂^[13];基于法布里-珀罗干涉的磁场传感器磁流体直接参与光传输,制作方法复杂,灵敏度高但易损坏^[14];基于萨格纳克干涉的磁场传感器灵敏度低,封装尺寸大,温度交叉敏感高^[11];基于光纤布拉格光栅的磁场强度传感器温度交叉敏感低,但灵敏度低、结构复杂^[15];基于多模干涉的磁场传感器由于其制作简单,结构紧凑,灵敏度高,成本低,受到了更多关注^[16]。

多模干涉^[17]通过多种光纤结构实现,例如多模单芯(多芯)光纤、光子晶体光纤等。2013年,Wang等^[18]利用单模-多模-单模(SMS)干涉结构,将12 mm长的多模光纤拼接在单模光纤中,利用多模光纤耦合,激发更多的光模式传输,从而提高传感器的感光度和测量精度,结合磁流体后传感器灵敏度可达168.6 pm/mT。Chen等^[19]以此为基础,在单模光纤中间拼接长度为9.4 cm的无芯光纤进行耦合,可以实现灵敏度为905 pm/mT的磁场检测。2018年,Ding等^[20]研制了一种基于马赫-曾德尔干涉结构,结合20 mm长光子晶体光纤的磁场传感器,通过熔接单模-多模-光子晶体光纤-单模得到干涉结构,在光子晶体光纤上采用激光刻蚀凹槽,最后用磁流体填充凹槽内形成包层进行磁场传感,该传感器的灵敏度为73.34 pm/mT。2019年,Lei等^[21]提出多模-单模-多模干涉结构,将该结构密封在毛细玻璃管中进行磁场测量,传感灵敏度可达123 pm/mT。

上述基于磁流体和多模干涉的光纤磁场传感器具有相对较高的灵敏度,对应传感系统通过波长解调^[22-23]来获取传感信息,受限于解调方式其系统分辨率实测均大于1 mT,难以解调获得高分辨磁场信息进而来分析微小磁场的变化。

本文搭建了基于磁流体包覆单模-无芯-单模(SMF-NCF-SMF, SNCS)结构的光纤磁场传感系统,将

包覆有磁流体的 SNCS 干涉结构与工作波长在1 550 nm的环形激光器连接,使用强度解调技术进行解调传感信息,并与波长解调系统进行实验对比,以期实现对微弱磁场的检测以及对磁场微小变化的分析。

1 磁场传感原理及传感结构的制作

1.1 磁场传感原理

无芯光纤以光纤外部环境为包层,故而无芯光纤构成的多模干涉结构对外部环境十分敏感,温度交叉敏感低。其干涉结构存在自成像效应,相比其他光纤更适用于磁场检测。

假设干涉结构中光纤中心对齐,单模光纤中光向无芯光纤传输进行耦合时,在无芯光纤中仅存在线性偏振模 LP_{0m} ,则无芯光纤传输的光场分布^[24]可以定义为

$$E(r, 0) = \sum_{m=1}^M c_m \psi_m(r) \quad (1)$$

式中: r 为干涉结构中无芯光纤输入端的零点横向坐标; M 为单模光纤进入无芯光纤耦合激发的高阶模数; ψ_m 为模式 LP_{0m} 的场分布; c_m 为模式 LP_{0m} 的耦合系数, c_m 可表示为

$$c_m = \frac{\int_0^{\infty} E(r, 0) \psi_m(r) r dr}{\int_0^{\infty} \psi_m(r) \psi_m(r) r dr} \quad (2)$$

根据倏逝场吸收理论^[25],磁流体会吸取无芯光纤中传输的光,光场的能量被转移到磁流体中,使光场的强度减弱。衰减后的光场分布为

$$E(r, z) = \sum_{m=1}^M c_m \psi_m \exp(-\gamma_m z) \exp(i\beta_m z) \quad (3)$$

式中: γ_m 为倏逝场吸收系数; β_m 为模式 LP_{0m} 在无芯光纤中的传播常数; z 为干涉结构中无芯光纤输入端的纵坐标。在单模-无芯-单模结构中,光传输会存在多模干涉,结合磁流体倏逝场吸收效应,其透射率为

$$T = 10 \lg \left[\frac{\left| \int_0^{\infty} E(r, z) E(r, 0) r dr \right|^2}{\int_0^{\infty} |E(r, z)|^2 r dr \int_0^{\infty} |E(r, 0)|^2 r dr} \right] \quad (4)$$

式(4)表明,当磁流体受到磁场的作用时,其倏逝场吸收系数会发生变化,导致透射光谱的干涉波长和强度都会发生相应改变,通过测量透射光谱的变化即可实现磁场传感。

1.2 传感结构的制作

该传感结构如图1所示。

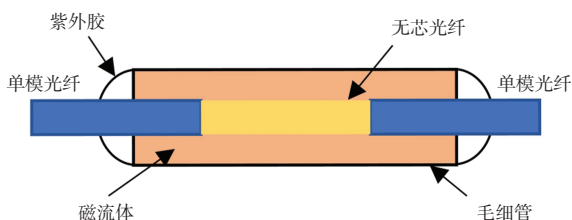


图 1 传感结构
Fig.1 Sensor structure

因使用的宽带光源在 C+L 波段,为了观察其变化趋势,选取长度为 59 mm、包层直径为 125 μm 的无芯光纤与同样包层规格的单模光纤熔接在一起得到 SNCS 结构。再将其插入毛细管(glass tube)中,其内径为 0.3 mm、长度为 80 mm,保证 SNCS 结构周围被磁流体(MF)填充。将质量浓度为 0.59 g/cm³ 的磁流体(EMG605, Ferrotec Inc)吸入注射器,置于毛细管的端口并注入毛细管中,利用毛细管的毛细效应使得磁流体能充分填充在毛细管中,并保证 SNCS 结构完全沉浸在磁流体中。最后,使用紫外光学固化胶(UV Curing)对磁流体和 SNCS 结构进行密封封装。

2 基于磁流体包覆 SNCS 结构磁场传感实验

针对同一传感结构,分别搭建波长解调磁场传感系统和基于磁流体包覆 SNCS 结构的光纤磁场传感系统,并分别对磁场特性进行分析。波长解调磁场传感系统用于对照文献中所用解调系统。

2.1 波长解调磁场传感系统

图 2 所示为波长解调传感系统。本系统使用的宽带光源为 AFR 公司的放大自发辐射(ASE)宽带光源,输出波长范围为 1 520~1 580 nm;解调使用日本横河电机公司的 AQ6317B 型高性能光波光谱分析仪(OSA),最小分辨率可达 0.02 nm。

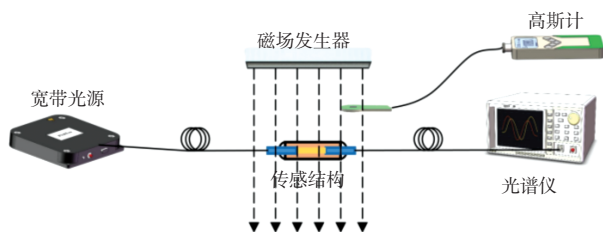
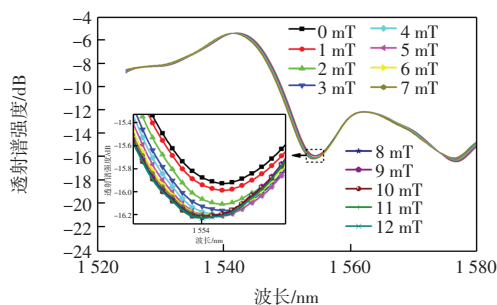


图 2 波长解调磁场传感系统

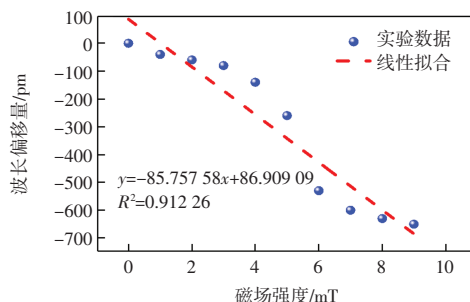
Fig.2 Wavelength demodulation magnetic field sensing system

磁场由磁场发生器产生,通过控制电压来实现磁场可控,传感结构平行放置于磁场发生器的下方,将高斯计(GS)放置在传感结构旁,实现对磁场变化的实时监测。

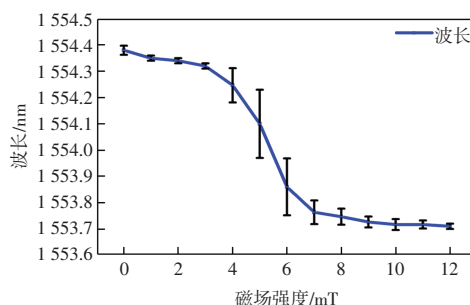
实验在室温 25 °C 的环境下进行,磁场强度从 0 mT 逐渐增加到 20 mT,步进为 1 mT。0 mT 到 12 mT 间变化趋势呈线性且具有最优灵敏度,而从 12 mT 继续增大磁场强度,则透射光谱漂移变化小,甚至不再发生变化,所以为了观察其变化趋势,本文仅绘制了磁场范围为 0~12 mT 的光谱。达到预设磁场强度 5 min 后分别测量系统的输出光谱,结果如图 3 所示。



(a) 磁场强度从 0 mT 增加到 12 mT 系统输出光谱



(b) 输出光谱波长偏移量与磁场强度线性拟合



(c) 输出光谱中心波长与磁场强度线性拟合

图 3 波长解调系统加磁实验结果

Fig.3 Experimental results of wavelength demodulation system with magnetic field

由图 3(a)可知,随着磁场强度增大,系统的输出光谱发生红移;由图 3(b)可知,输出光谱特征谷波长偏移量与磁场强度变化呈线性,磁场灵敏度为 -85.7 pm/mT,线性度为 91.2%,具有良好的线性响应;由图 3(c)可知,波长解调磁场传感系统可检测到的最小磁场变化为 1 mT。

2.2 基于磁流体包覆 SNCS 结构的光纤磁场传感系统

基于磁流体包覆 SNCS 结构的光纤磁场传感系统如图 4 所示。

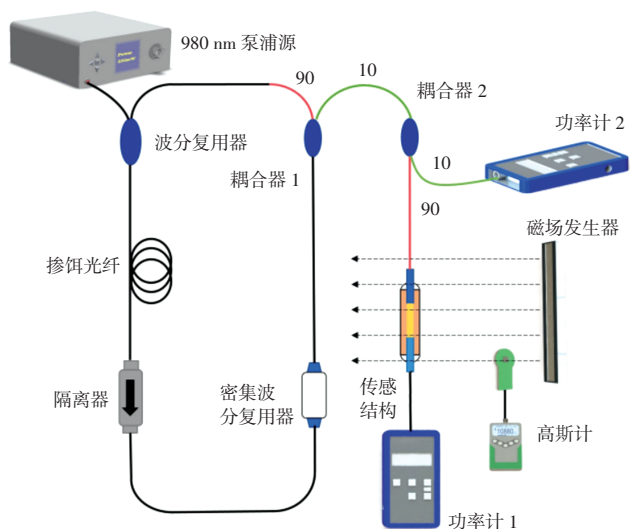


图4 基于磁流体包覆 SNCS 结构的光纤磁场传感系统
Fig.4 Fiber optic magnetic field sensing system based on SNCS structure covered with magnetic fluid

在此系统中采用 980 nm 的半导体激光器作为泵浦源,通过波分复用器(WDM,980/1 550 nm)将泵浦光耦合到环形腔中。掺铒光纤(EDFC-980-HP)作为激射介质被泵浦源激发光束,激光器输入光信号,在光纤中被铒离子吸收并受激发射,从而放大光信号的强度,平衡增益和损耗后选取其长度为 3.0 m。隔离器保证光纤环形激光器中光的单向传输,阻止反向传播的光束进入谐振腔,抑制激光在谐振腔中多次往返传播时产生的空间烧孔效应,降低光学元件损坏和性能下降的可能性。选取工作波长在 1 550.85 nm 的密集波分复用器(DWDM)作为系统输出波长选择器件,连接到环形激光器中。利用耦合器实现光功率分配,耦合器 1 的 90%输出端口接入光路中形成环形腔,将大部分能量返回腔内;耦合器 1 另一个输出端口后连接耦合器 2,用于连接传感结构。耦合器 2 将输出信号分为传感路和参考路:10%输出端口作为参考路,接入美国 Thorlabs 公司的 PM20C 型功率计 1(分辨率为 1 nW);90%输出端口作为传感路,与传感结构相连后接入功率计 2。2 个功率计的检测值分别作为光纤激光器的输出功率和光纤激光器接入传感结构后的输出功率,2 个功率计的实时比值可以消除光纤激光器自身波动的影响,提高系统稳定性,并获得环境磁场信息变化。实验中,将激光器泵浦源设为 250 mW,传感结构平行放置于磁场发生器的下方,调节电压,增大磁场强度,步进为 0.05 mT。达到预设磁场强度 5 min 后,将高斯计放置在传感结构旁,实时监测磁场变化。

2.2.1 输出响应分析

系统输出功率相对强度和磁场强度变化响应如

图 5 所示。

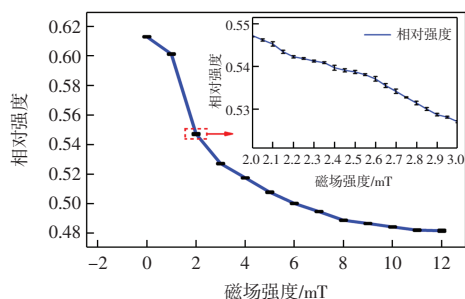


图5 磁场与系统输出功率相对强度变化响应
Fig.5 Response of magnetic field to relative intensity variation of system output power

由图 5 可知,当磁场强度从 0 mT 增加到 12 mT 时,此系统的输出功率相对强度从 0.612 9 降低到 0.481 7,其中对应传感路功率从 544.542 μW 降低到 427.947 μW ,可得其灵敏度为 9.716 $\mu\text{W}/\text{mT}$ 。图 5 中插图显示了磁场强度从 2 mT 增加到 3 mT 的输出响应,磁场步进为 0.05 mT,系统输出功率相对强度从 0.547 2 降低到 0.527 1。结果表明,系统在 0.05 mT 的磁场变化下,功率计能够准确检测出传感系统的输出变化,并且输出功率相对强度与分辨率为 0.05 mT 的环境磁场一一对应。

2.2.2 分辨率分析

与波长解调系统相比,基于磁流体包覆 SNCS 结构的光纤磁场传感系统的磁场分辨率由 1.00 mT 提升到 0.05 mT。本文所设计系统实测分辨率与相关文献中实测分辨率进行了比较,结果如表 1 所示。

表 1 分辨率对比

Tab.1 Comparison of resolution

干涉原理	传感结构	系统分辨率/mT	参考
MZI	SMF-PCF-SMF	0.422	[7]
FP	SMF-AIR-NCF-MF	5.1	[10]
Sagnac	SMF-PCF-SMF	5	[11]
	SMF-MMF-SMF	5.1	[18]
MMI	MMF-SMF-MMF	2.7	[21]
	SMF-NCF-SMF	0.05	本文工作

2.2.3 输出稳定性分析

为验证系统输出稳定性这一重要指标,调节磁场环境分别保持在 0、3、4、5 mT,每隔 30 min 记录 1 次传感系统的输出功率相对强度和中心波长,共持续 300 min,结果如图 6 所示。由图 6 可知,不同磁场强度下输出功率相对强度的测量误差均小于 0.008%,系统中心波长变化范围不超过 0.001 nm。由此表明,该系统在长时间的测量中呈现出稳定的输出,波动较小。

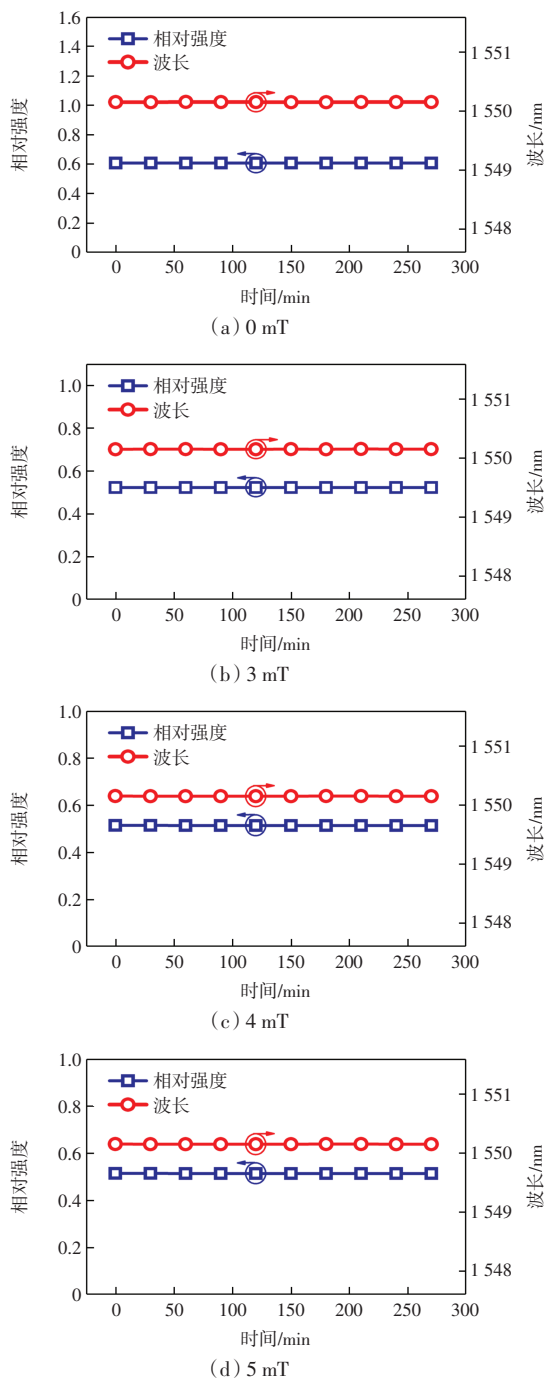


图 6 不同磁场强度下系统输出波长和输出功率相对强度波动变化

Fig.6 Variation of system output wavelength and relative intensity fluctuation of output power under different magnetic field intensities

2.2.4 温度交叉敏感性分析

磁场传感中温度交叉敏感对于测量结果有一定影响:一方面光纤结构会受热光效应影响;另一方面磁流体自身纳米粒子热运动受温度变化的影响,故而需要分析传感系统的温度响应特性。

温度响应实验中,将传感结构紧贴温控台(分辨

率为 0.1 ℃)表面以确保传感结构与温控台温度一致,温度由 30 ℃上升至 48 ℃,步进为 3 ℃。为保证测量的可靠性,当温控台达到预设温度 10 min 后,再记录传感路输出功率和中心波长,实验结果如图 7 所示。

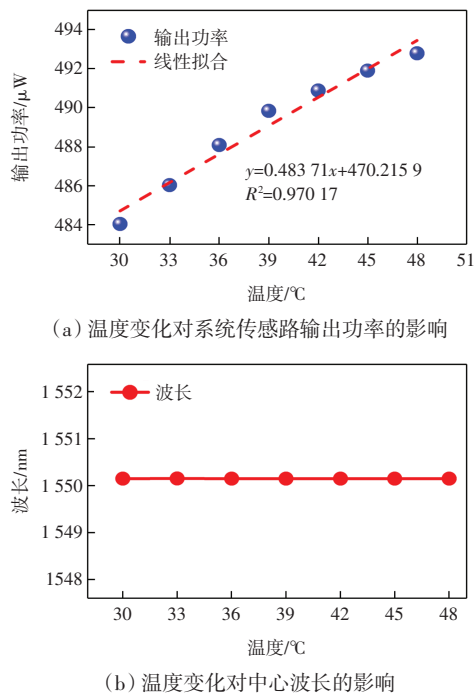


图 7 温度交叉敏感实验

Fig.7 Temperature cross-sensitivity experiment

由图 7 可知,传感路的输出功率和中心波长位置与温度变化呈线性关系,系统的温度交叉灵敏度为 0.484 μW/℃,其中心波长的波动变化小于 0.01 nm。由此说明,该系统具有较低的温度交叉敏感性,磁场测量结果几乎不受环境温度变化的影响。

3 结论

本文设计实现了一种基于磁流体包覆 SNCS 结构的光纤磁场传感系统。将包覆有磁流体的 SNCS 干涉结构与工作波长在 1550 nm 的环形激光器连接,使用强度解调技术进行解调传感信息。采用该系统进行磁场测量,并与波长解调系统进行磁场分辨率对比;对于系统的温度交叉敏感特性和稳定性进行了实验验证。结果表明:

- (1) 与波长解调系统相比,本文设计系统可使得磁场分辨率由 1.00 mT 提升到 0.05 mT,提高了 20 倍。
- (2) 该系统输出测量误差小于 0.008%,温度交叉灵敏度为 0.484 μW/℃,说明该系统在长时间的测量中呈现稳定输出,且磁场测量结果几乎不受环境温度变化的影响。

(3) 基于磁流体包覆 SNCS 结构的光纤磁场传感系统结构简单,输出功率稳定,温度交叉敏感度低,有望应用于电力工业、航空航天研究等领域。

参考文献:

- [1] 齐晨英,徐常平,白扬博,等. 基于非绝热型微光纤的高灵敏度磁场传感器[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2406003.
QI C Y, XU C P, BAI Y B, et al. High-sensitivity magnetic field sensor based on non-adiabatic micro-fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2406003(in Chinese).
- [2] LIU C, SHEN T, WU H B, et al. Applications of magnetostrictive, magneto-optical, magnetic fluid materials in optical fiber current sensors and optical fiber magnetic field sensors: A review[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65: 102634.
- [3] LIU M Y, WU Y B, DU C R, et al. FBG-based liquid pressure sensor for distributed measurement with a single channel in liquid environment[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(16): 9155-9161.
- [4] 荆雅洁,韩笑笑,杨濠琨,等. 基于菲涅尔反射的磁流体折射率可调谐特性研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(7): 669-674.
JING Y J, HAN X X, YANG H K, et al. Study on the tunable properties of refractive index of magnetic fluid based on Fresnel reflection theory[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2020, 31(7): 669-674(in Chinese).
- [5] 姜智鹏,赵伟,屈凯峰. 磁场测量技术的发展及其应用[J]. 电测与仪表, 2008, 45(4): 1-5, 10.
JIANG Z P, ZHAO W, QU K F. Development and application of magnetic field measurement technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(4): 1-5, 10(in Chinese).
- [6] WANG E L, CHENG P, LI J, et al. High-sensitivity temperature and magnetic sensor based on magnetic fluid and liquid ethanol filled micro-structured optical fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 55: 102161.
- [7] ZU P, CHAN C C, LEW W S, et al. Temperature-insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(2): 491-498.
- [8] MITU S A, DEY D K, AHMED K, et al. Fe₃O₄ nanofluid injected photonic crystal fiber for magnetic field sensing applications[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 494: 165831.
- [9] ZHAO Y, WANG X X, LV R Q, et al. Highly sensitive reflective Fabry-perot magnetic field sensor using magnetic fluid based on vernier effect[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 7000808.
- [10] SHI F Q, LUO Y, CHE J J, et al. Optical fiber F-P magnetic field sensor based on magnetostrictive effect of magnetic fluid[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 43: 35-40.
- [11] WANG W H, ZHANG H M, LI B, et al. Optical fiber magnetic field sensor based on birefringence in liquid core optical waveguide[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50: 114-117.
- [12] WEI F F, LIU D J, MALLIK A K, et al. Magnetic field sensor based on a tri-microfiber coupler ring in magnetic fluid and a fiber Bragg grating[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5100.
- [13] LUO Y, LEI X Q, SHI F Q, et al. A novel optical fiber magnetic field sensor based on Mach-Zehnder interferometer integrated with magnetic fluid[J]. Optik, 2018, 174: 252-258.
- [14] WANG J, ZHANG Z, LI S G, et al. Micro-structured optical fiber magnetic field sensor based on magnetic fluid filling[J]. Modern Physics Letters B, 2019, 33(31): 1950380.
- [15] CHEN Y F, HAN Q, YAN W C, et al. Magnetic-fluid-coated photonic crystal fiber and FBG for magnetic field and temperature sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(23): 2665-2668.
- [16] 曹东,刘桂雄,邱东勇,等. 磁流体传感器研究现状与发展趋势[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(5): 5-6, 9.
CAO D, LIU G X, QIU D Y, et al. Status and development trend of magnetic fluid sensors[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(5): 5-6, 9(in Chinese).
- [17] SOLDANO L B, PENNING S E C M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(4): 615-627.
- [18] WANG H T, PU S L, WANG N, et al. Magnetic field sensing based on singlemode-multimode-singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding[J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3765-3768.
- [19] CHEN Y F, HAN Q, LIU T G, et al. Optical fiber magnetic field sensor based on single-mode-multimode-single-mode structure and magnetic fluid[J]. Optics Letters, 2013, 38(20): 3999-4001.
- [20] DING X Z, YANG H Z, QIAO X G, et al. Mach-Zehnder interferometric magnetic field sensor based on a photonic crystal fiber and magnetic fluid[J]. Applied Optics, 2018, 57(9): 2050.
- [21] LEI X Q, XU Y C, YU Y T, et al. Fiber in-line magnetic field sensor based on Mach-Zehnder interferometer integrated with magnetic fluid[J]. Optoelectronics Letters, 2019, 15(1): 43-47.
- [22] 周朕蕊,邱宗甲,李康,等. 光纤法布里-珀罗传感器的解调方法研究综述[J]. 光电工程, 2022, 49(6): 210411.
ZHOU Z R, QIU Z J, LI K, et al. Review on demodulation methods for optic fiber Fabry-Perot sensors[J]. Opto-Electronic