

文章编号 1004-924X(2024)15-2344-11

## 基于增强型谐波游标效应的光纤温度传感器

林子曦<sup>1,3</sup>, 李雨婷<sup>2,3</sup>, 杨玉强<sup>1,2,4\*</sup>, 李依潼<sup>2,3,4\*</sup>, 张钰颖<sup>2,4</sup>

- 广东海洋大学 深圳研究院, 深圳 518120;
- 广东海洋大学 广东省南海海洋牧场智能装备重点实验室, 广东 湛江 524088;
- 广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088;
- 广东海洋大学 智慧海洋传感网及其装备工程技术研究中心, 广东 湛江 524088)

**摘要:** 提出一种基于增强型谐波游标效应增敏的光纤温度传感器, 该传感器由光纤萨格奈克干涉计(Sagnac Interferometer, SI)和法布里-珀罗干涉计(Fabry-Perot Interferometer, FPI)级联构成。通过控制FPI的自由光谱范围为SI的自由光谱范围的整数倍且两者具有相反的温度响应, 实现增强型谐波游标效应。实验结果表明, 增强型谐波游标效应和增强型普通游标效应具有几乎相同的温度灵敏度, 分别为单个FPI和SI灵敏度的28.7倍和16.9倍, 增强型谐波游标放大倍率分别为普通谐波游标放大倍率的3.4倍和1.8倍, 但增强型谐波游标效应对应的熊猫光纤长度失谐量明显大于增强型普通游标效应, 且阶数越高对应的失谐量越大, 因此, 增强型谐波游标放大倍率更容易控制和实现。该传感器在获取高灵敏度的同时, 稳定性能好、制备成本低, 具有非常好的应用前景。

**关键词:** 光纤传感器; 法布里-珀罗干涉计; 萨格奈克干涉计; 增强型游标效应; 谐波游标效应; 温度传感器  
**中图分类号:** O436; TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243215.2344

## Fiber optic temperature sensor based on enhanced harmonic vernier effect

LIN Zixi<sup>1,3</sup>, LI Yuting<sup>2,3</sup>, YANG Yuqiang<sup>1,2,4\*</sup>, LI Yitong<sup>2,3,4\*</sup>, ZHANG Yuying<sup>2,4</sup>

- Shenzhen Institute, Guangdong Ocean University, Shenzhen 518120, China;
- Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Equipment for South China Sea Marine Ranching, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;
- College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;
- Research Center of Guangdong Smart Oceans Sensor Networks and Equipment Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

\* Corresponding author, E-mail: yuqiangy110@sina.com; liyitongfly@163.com

**Abstract:** The proposed temperature sensor utilizes the enhanced harmonic vernier effect in an optical fiber system, combining an optical fiber Sagnac interferometer (SI) with a Fabry-Perot interferometer (FPI).

收稿日期: 2024-05-15; 修订日期: 2024-06-07.

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目 (No. 2023A1515011212); 深圳市基础研究面上项目 (No. JCYJ20210324122813036); 广东省普通高校重点领域专项 (No. 2021ZDZX1015); 广东海洋大学科研启动经费资助项目 (No. 060302112009)

By aligning the FPI's free spectral range as a multiple of the SI's, with opposite temperature responses, the enhanced harmonic vernier effect is achieved. Experiments show that this effect and the enhanced normal vernier effect have comparable temperature sensitivity, being 28.7 and 16.9 times greater than those of single FPI and SI, respectively. In addition, the magnification of the enhanced harmonic vernier is 3.4 and 1.8 times that of the normal harmonic vernier. However, the detuning of the Panda fiber length for the enhanced harmonic vernier effect is significantly larger than for the enhanced normal vernier effect, with detuning increasing with order. The enhanced harmonic vernier's magnification is also easier to control at higher orders. The sensor demonstrates high sensitivity, excellent stability, and low preparation cost, offering promising prospects for practical applications.

**Key words:** fiber-optic sensor; Fabry-Perot interferometer; Sagnac interferometer; enhanced vernier effect; harmonic vernier effect; temperature sensors

## 1 引言

温度测量对于环境监测、生物诊断、化学工业等领域至关重要<sup>[1-3]</sup>。与传统的温度传感器相比,光纤干涉型传感器具有结构紧凑、灵敏度高、稳定性好,以及抗电磁干扰等优点,在温度测量领域受到了广泛关注<sup>[4]</sup>。但在自然灾害预测、水质参量检测等对温度灵敏度要求较苛刻的领域,光纤干涉型传感器仍存在不足。因此,探索光纤敏化方法,实现光纤干涉型传感器的高灵敏度测量一直是研究的焦点。

光学游标效应是一种提高光纤干涉型传感器灵敏度的有效方法。光学游标分为普通游标效应和谐波游标效应。当自由光谱范围接近但不相等的两光纤干涉计级联或并联时,仅一个干涉计对被测参量敏感,产生的游标效应称为普通游标效应<sup>[5-7]</sup>。当一个干涉计的自由光谱范围约为另一个干涉计的整数倍时,产生的游标效应称为谐波游标效应。2014年,Zhang等<sup>[8]</sup>将两个自由光谱范围相近的法布里-珀罗干涉仪(FPI)级联,首次实现了普通光学游标效应。2017年,Yang等<sup>[9]</sup>将FPI和萨格奈克干涉仪(SI)级联构成传感器,利用自由光谱范围的微小差异获得了高达29 nm/°C的温度灵敏度,约为单个SI的20倍。2018年,Yu等<sup>[10]</sup>将两个自由光谱范围相近的马赫-曾德尔干涉计(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)级联实现了高灵敏度温度传感,级联后传感器的温度灵敏度较单个MZI提高了100

多倍。普通游标效应利用自由光谱范围的微小差异来精确控制灵敏度的放大倍率,限制了传感器设计的自由度。为了突破普通游标效应1倍关系的限制,2019年,Gomes等<sup>[11]</sup>首次提出利用FPI实现谐波游标效应的方法,并于次年<sup>[12]</sup>成功制备了基于1阶谐波游标效应的双FPI传感器,用于温度和应变测量,灵敏度分别为-650 pm/°C和146.3 pm/με。2023年,Yang等<sup>[13-14]</sup>先后提出FPI和SI级联以及双SI级联的温度传感器,利用其自由光谱范围呈倍数的关系实现了1阶和2阶谐波游标效应,并对谐波游标效应的失谐量进行深入分析,在降低传感器制备难度的同时,实现了灵敏度放大。

为进一步提高灵敏度,研究人员提出了增强型游标效应,即两干涉计均对被测参量敏感且具有相反的响应。2020年,Lang等<sup>[15]</sup>将两个对温度响应相反的FPI并联,设计了一种基于增强型游标效应的高灵敏度温度传感器,其灵敏度达到39.21 nm/°C,相比于普通游标效应,灵敏度提高了1.35倍。2021年,Luo等<sup>[16]</sup>设计了一种新型高灵敏度温度传感器,该传感器巧妙利用了SI和MZI对温度响应相反的特性,获得了高达20.86 nm/°C的灵敏度,相较于普通游标效应,其灵敏度提升了1.46倍。2022年,本课题组<sup>[17]</sup>通过并联两个对温度具有相反响应的聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)微腔,成功实现了增强型普通游标效应,该传感器的温度放大倍率高达10.7,显著高于普通游标效应。2023年我

们<sup>[18]</sup>提出一种基于 FPI 和 SI 级联的高灵敏度温度传感器,该传感器中 FPI 与 SI 具有相反的温度响应,基于增强型普通游标效应,在 36~39 °C 内灵敏度达到 -57.85 nm/°C。从实际应用的角度来看,增强型谐波游标效应灵敏度明显优于普通游标效应,但仍需精细控制光程长度,给传感器的制备带来难度。

本文将谐波游标效应与增强型游标效应的优点相结合,提出一种基于增强型谐波游标效应的高灵敏度光纤温度传感器。该传感器由 SI 与 FPI 级联构成,其中,SI 由单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)环内熔接一段熊猫光纤构成,而 FPI 为 PDMS 腔,由 PDMS 填充空芯光纤(Hollow Core Fiber, HCF)而成。随温度的增加,SI 和 FPI 的干涉谱分别逐渐蓝移和红移,从而满足产生增强型游标效应的必备条件。为了产生谐波游标效应,将 FPI 的腔长固定,改变 SI 中熊猫光纤的长度,使 FPI 的自由光谱范围约为 SI 的整数倍,从而满足了谐波游标效应产生的必备条件。

## 2 原理

本文提出的基于增强型谐波游标效应的光纤温度传感器原理如图 1 所示,它由宽谱光源(Broadband Source, BBS)、光纤耦合器(50:50)、光纤环形器、SI 干涉计、FPI 干涉计、温控箱(Temperature Controlled Furnace, TCF)和光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)构成。其中,BBS 的型号为 Golight,光源波长为 1 400~1 600 nm,输出光功率为 -17 dBm;TCF 为菲斯

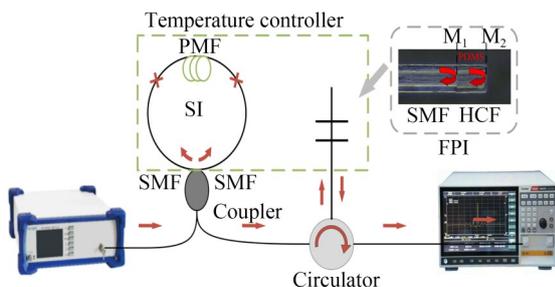


图 1 基于 SI 和 FPI 级联的传感器原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature sensor employing a cascade configuration of SI and FPI

福 WGL-30B,温度为 RT+10~300 °C,控制精度为 0.1 °C;OSA 的型号为 Ceyear 6362D,最小光谱分辨率为 0.02 nm。宽谱光源发出的信号光经耦合器进入 SI,然后经光纤环形器后进入 FPI,最后被光谱仪接收。SI 和 FPI 具有相反的温度响应且 FPI 光程约为 SI 的整数倍,级联后产生增强型谐波游标效应。

依据熊猫光纤的双折射效应,SI 的干涉谱可表示为:

$$I_{SI}(\lambda) = I_0 \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi BD}{\lambda}\right) \right], \quad (1)$$

式中: $I_0$ 为透射光的光强, $D$ 为熊猫光纤的长度, $B$ 为熊猫光纤的双折射系数。由式(1)可知,SI 的自由光谱范围和温度灵敏度分别为:

$$\begin{cases} FSR_{SI} = \frac{\lambda^2}{BD} \\ S_{SI} = \frac{d\lambda_n}{dT} = \frac{\lambda_n}{B} \frac{dB}{dT} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\lambda_n$ 为 SI 干涉谱第  $n$  个峰值波长, $dB/dT$ 为熊猫光纤双折射系数随温度的变化率。式(2)表明,SI 的温度灵敏度与双折射系数的温度变化率成正比,与熊猫光纤的长度无关。由于熊猫光纤的双折射系数随温度的增大而减小,因此  $S_{SI} < 0$ ,即随温度的升高,SI 的干涉谱向短波方向蓝移。

由于 FPI 中 PDMS 腔的反射面  $M_1$  和  $M_2$  的反射率都非常低,FPI 的反射谱为典型的双光束干涉,因此,FPI 的干涉谱可表示为:

$$I_{FPI}(\lambda) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi nl}{\lambda}\right), \quad (3)$$

式中: $I_1, I_2$ 分别为由  $M_1, M_2$  反射回 SMF 的光强, $n \approx 1.41$ 为 PDMS 的折射率, $l$ 为 FPI 中 PDMS 腔的腔长。由式(3)可知,FPI 的自由光谱范围和温度灵敏度分别为:

$$\begin{cases} FSR_{FPI} = \frac{\lambda_m^2}{2nl} \\ S_{FPI} = \frac{d\lambda_m}{dT} = \lambda_m \left( \alpha + \frac{\beta}{n} \right) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $\lambda_m$ 为 FPI 干涉谱第  $m$  个峰值波长(通常选在 1 500~1 550 nm 附近), $\alpha \approx 9.6 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 和  $\beta \approx -5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ ,分别为 PDMS 的热膨胀系数和热光系数。将以上参数代入式(4)可知, $S_{FPI} > 0$ ,即

随着温度的升高,FPI的干涉谱向长波方向红移。

由此可知,当温度变化时,SI和FPI均对温度敏感且表现出相反响应。根据增强型游标效应和谐波游标效应的定义,当FPI的自由光谱范围约为SI的*i*(*i*=0,1,2,3,…)倍时,则SI和FPI级联后传感器会产生增强型谐波游标效应。当*i*=0时,干涉谱产生增强型普通游标效应,干涉谱呈单包络;当*i*=1时,干涉谱产生增强型1阶谐波游标效应,干涉谱呈形状相似的双包络;当*i*=2时,干涉谱产生增强型2阶谐波游标效应,干涉谱呈形状相同的三包络;对于更高阶谐

波游标效应,依次类推。

增强型*i*阶谐波游标效应的干涉谱包络可表示为:

$$I_{EN}^i = I_{SI}(\lambda) \cdot I_{FPI}(\lambda) = A + 2m \cos \left[ \frac{2\pi(2nl - BD^i)}{\lambda} \right], \quad (5)$$

式中:*A*为干涉谱包络的直流部分,*m*为干涉谱包络交流部分的振幅,*D<sup>i</sup>*为产生增强型*i*阶谐波游标效应时对应的熊猫光纤长度。增强型*i*阶谐波游标效应干涉谱包络的自由光谱范围可表示为:

$$\begin{cases} FSR_{EN}^i = \frac{\lambda^2}{2(2nl - BD^i)} = \frac{FSR_{FPI} \cdot (i+1) FSR_{SI}^i}{FSR_{FPI} - (i+1) FSR_{SI}^i} & (2nl > BD^i) \\ FSR_{EN}^i = \frac{\lambda^2}{2(BD^i - 2nl)} = \frac{FSR_{FPI} \cdot (i+1) FSR_{SI}^i}{(i+1) FSR_{SI}^i - FSR_{FPI}} & (2nl < BD^i) \end{cases} \quad (6)$$

由于本传感器中SI和FPI均对温度敏感,且温度响应相反,因此,级联后干涉谱包络移动量

远远大于单个SI和单个FPI,级联后干涉谱包络的温度灵敏度可表示为:

$$\begin{cases} S_{EN}^i = -M_1^i S_{FPI} + M_2^i S_{SI}^i = -M_1^{i'} S_{FPI} = M_2^{i'} S_{SI}^i & (FSR_{FPI} > (i+1) FSR_{SI}^i) \\ S_{EN}^i = M_1^i S_{FPI}^i - M_2^i S_{SI}^i = M_1^{i'} S_{FPI} = -M_2^{i'} S_{SI}^i & (FSR_{FPI} < (i+1) FSR_{SI}^i) \end{cases} \quad (7)$$

式中:*M<sub>1</sub><sup>i</sup>*和*M<sub>2</sub><sup>i</sup>*分别为SI和FPI作为参考干涉计时,普通*i*阶谐波游标效应的放大倍率;*M<sub>1</sub><sup>i'</sup>*和

*M<sub>2</sub><sup>i'</sup>*分别为相对于单个FPI和SI,增强型*i*阶谐波游标效应的放大倍率。*M<sub>1</sub><sup>i</sup>*和*M<sub>2</sub><sup>i</sup>*分别为:

$$\begin{cases} M_1^i = \frac{(i+1) FSR_{SI}^i}{|(i+1) FSR_{SI}^i - FSR_{FPI}|} = \frac{2nl}{\left| 2nl - \frac{BD^i}{i+1} \right|} = \frac{2nl}{\left| \frac{B\Delta D^i}{i+1} \right|} \\ M_2^i = \frac{FSR_{FPI}}{|FSR_{FPI} - (i+1) FSR_{SI}^i|} = \frac{\frac{BD^i}{i+1}}{\left| \frac{BD^i}{i+1} - 2nl \right|} = \frac{BD^i}{|B\Delta D^i|} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta D^i$ 为FPI和SI产生增强型*i*阶谐波游标效应时,熊猫光纤的长度失谐量。由于FPI的光程不变,因此,增强型谐波游标效应的放大倍率仅由熊猫光纤的长度失谐量决定。当普通增强型游标效应和增强型*i*阶谐波游标效应的放大倍率相同时,即*M<sub>1</sub><sup>0</sup>*=*M<sub>1</sub><sup>i</sup>*,*M<sub>2</sub><sup>0</sup>*=*M<sub>2</sub><sup>i</sup>*,则:

$$\Delta D^i = (i+1) \Delta D^0. \quad (9)$$

由式(9)可知,当游标放大倍率相同时,产生增强型谐波游标效应所需的熊猫光纤长度失谐量为增强型普通游标效应的*i*+1倍。从传感器制备的角度来看,光程长度的精细控制难以实现,因此,失谐量较大的基于增强型谐波游标效

应的传感器更容易制备。

对上述分析结果进行数值仿真,仿真参数如下:*I<sub>0</sub>*=0.1,*I<sub>1</sub>*=0.09,*I<sub>2</sub>*=0.009,*l*=105 μm,*n*=1.41,*B*=5.06×10<sup>-4</sup>,dB/dT=6.1×10<sup>-7</sup>,*D<sup>0</sup>*=65.00 cm,*D<sup>1</sup>*=130.00 cm,*D<sup>2</sup>*=200.00 cm, $\lambda_m$ =1550 nm。图2为*T<sub>0</sub>*和(*T<sub>0</sub>*+1)°C时,不同熊猫光纤长度的单个SI和单个FPI的干涉谱。由图可知,在1550 nm附近,不同熊猫光纤长度(*D<sup>0</sup>*=65.00 cm,*D<sup>1</sup>*=130.00 cm,*D<sup>2</sup>*=200.00 cm)的SI的自由光谱范围分别为*FSR<sub>SI</sub><sup>0</sup>*=7.30 nm,*FSR<sub>SI</sub><sup>1</sup>*=3.65 nm和*FSR<sub>SI</sub><sup>2</sup>*=2.37 nm;FPI的自由光谱范围为*FSR<sub>FPI</sub>*=8.1 nm;当温度升高1°C时,FPI的

干涉谱向长波方向移动,在 1 550 nm 附近波长移动量约为 0.98 nm,该结果与式(2)的计算结果一致;不同熊猫光纤长度的 SI 的干涉谱均向短波方向移动,在 1 550 nm 附近波长移动量约为 1.90

nm,该结果与式(4)的计算结果一致。由式(8)计算可知,普通 0 阶、1 阶和 2 阶谐波游标的放大倍率分别为  $M_1^0 \approx 9.1$ ,  $M_1^1 \approx 9.1$ ,  $M_1^2 \approx 7.2$ ,  $M_2^0 \approx 10.1$ ,  $M_2^1 \approx 10.1$ ,  $M_2^2 \approx 8.2$ 。

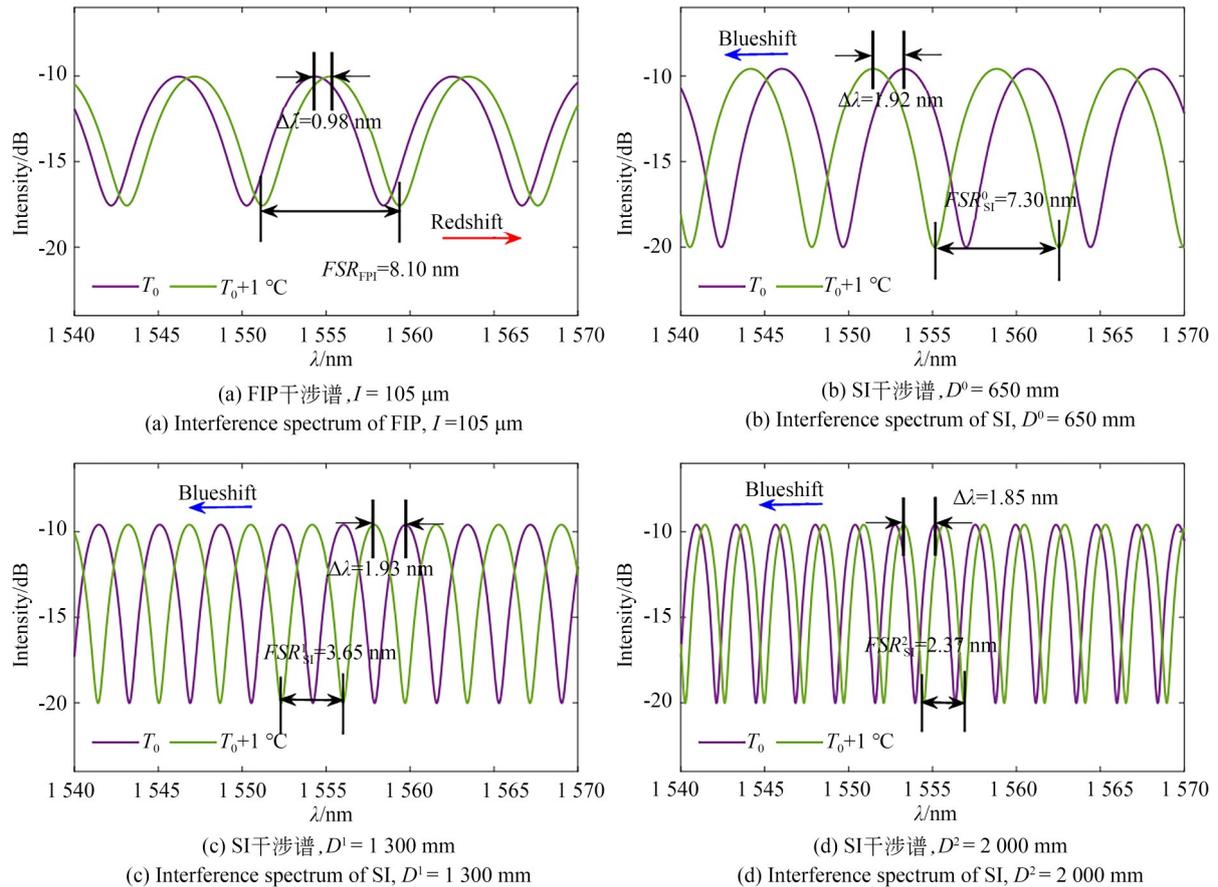


图 2 当温度由  $T_0$  升高到  $T_0 + 1$  °C 时 FPI 和 SI 的干涉谱变化

Fig. 2 Variation of interference spectra of FPI and SI with temperature increased from  $T_0$  to  $T_0 + 1$  °C

当温度为  $T_0$  和  $T_0 + 1$  °C 时,不同熊猫光纤长度的 SI 和 FPI 级联干涉谱如图 3 所示。由图 3 可知,当熊猫光纤长度分别为  $D^0 = 65.00$  cm,  $D^1 = 130.00$  cm 和  $D^2 = 200.00$  cm 时,SI 与 FPI 级联后干涉谱中分别出现了明显的单包络、双包络和三包络,表明 SI 与 FPI 分别产生了 0 阶、1 阶和 2 阶谐波游标效应;当温度由  $T_0$  °C 升高 1 °C 时,单包络、双包络和三包络均向短波方向移动,移动量分别为 31.32, 31.95 和 33.21 nm。由式(7)计算得到 0 阶、1 阶和 2 阶谐波游标效应放大倍率分别为:  $M_1^{0'} = 31.9 > M_1^0$ ,  $M_1^{1'} = 32.6 > M_1^1$ ,  $M_1^{2'} = 33.8 > M_1^2$ ,  $M_2^{0'} = 16.3 > M_2^0$ ,  $M_2^{1'} = 16.5 >$

$M_2^1$ ,  $M_2^{2'} = 17.9 > M_2^2$ 。由此可见,该传感器产生了增强型谐波游标效应,且增强型普通游标效应(0 阶)和增强型谐波游标效应(1 阶和 2 阶)的灵敏度放大倍率几乎相同。此外,由式(7)计算可知,0 阶、1 阶和 2 阶谐波游标效应对应的熊猫光纤长度失谐量分别为  $\Delta D^0 = -64.36$  mm,  $\Delta D^1 = -128.71$  mm 和  $\Delta D^2 = -243.90$  mm,与理论分析结果相符。由此可见,增强型谐波游标效应对应的失谐量明显大于增强型普通游标效应,且阶数越高对应的失谐量越大。因此,在放大倍率相同的前提下,增强型谐波游标效应的制备难度明显低于增强型普通游标效应。

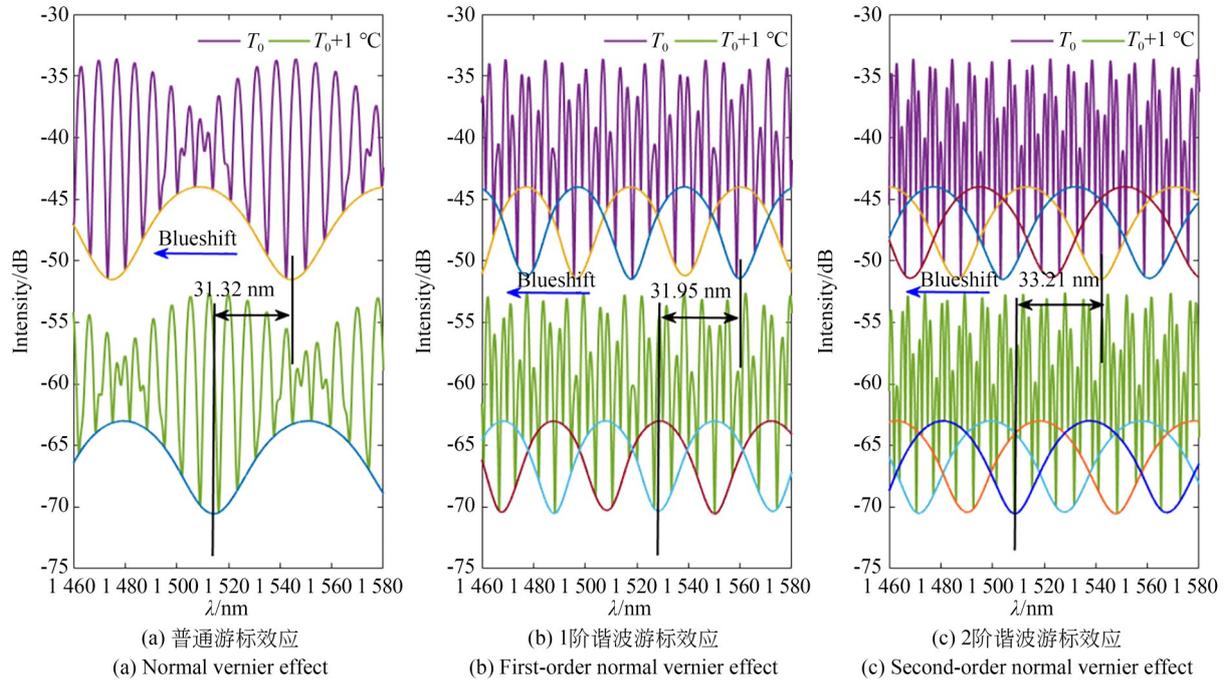


图 3 当温度由  $T_0$  升高到  $T_0+1\text{ }^\circ\text{C}$  时 FPI 和 SI 的级联干涉变化

Fig. 3 Cascade interference changes of FPI and SI with temperature increased from  $T_0$  to  $T_0+1\text{ }^\circ\text{C}$

### 3 实验结果及分析

图 4 为本实验中 SI 与 FPI 的制备过程。SI 的制备过程如下:在端面平整的两段单模光纤环内熔接一段已切割成预设长度的熊猫光纤,熊猫光纤的长度分别为  $D^0=657\text{ mm}$ 、 $D^1=1\text{ }215\text{ mm}$  和  $D^2=1\text{ }819\text{ mm}$ 。FPI 的制备过程如下:(1)将端面切割平整的单模光纤(SMF,直径约为  $125\text{ }\mu\text{m}$ )与空芯光纤(HCF,内径约为  $75\text{ }\mu\text{m}$ ,外径约

为  $150\text{ }\mu\text{m}$ )对芯熔接;(2)显微镜下将 HCF 切割为所需长度,然后将 SMF-HCF 固定在玻璃片上;(3)使用吸管将提前配置好的液态 PDMS 滴在 SMF-HCF 上,利用毛细现象使 PDMS 逐渐充满 HCF;(4)用酒精棉擦去 HCF 外多余的 PDMS,放置在  $80\text{ }^\circ\text{C}$  温控箱内固化 1 h。实验制备的 PDMS 腔的长度为  $105.33\text{ }\mu\text{m}$ 。本传感器实验装置如图 1 所示,SI 与 FPI 级联放置在温控箱内进行温度测试。

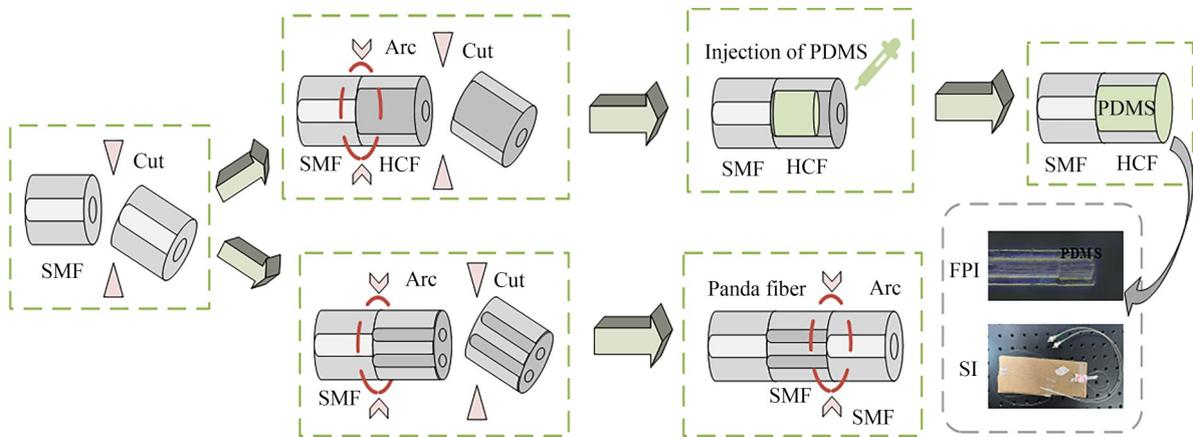


图 4 FPI 和 SI 的制备过程

Fig. 4 Preparation process of FPI and SI

图 5 为 30 °C 和 31 °C 时,不同熊猫光纤长度的 SI 和 FPI 的干涉谱。由图可知,不同熊猫光纤长度的 SI 和 FPI 的自由光谱范围分别为  $FSR_{SI}^0=7.34$  nm,  $FSR_{SI}^1=3.91$  nm,  $FSR_{SI}^2=2.67$  nm 和

$FSR_{FPI}=8.24$  nm。当温度由 30 °C 增加到 31 °C 时,不同熊猫光纤长度的 SI 干涉谱分别蓝移约 1.87, 1.95 和 1.91 nm, 移动量几乎相同, FPI 干涉谱红移约 1.14 nm, 说明 SI 和 FPI 对温度都敏感。

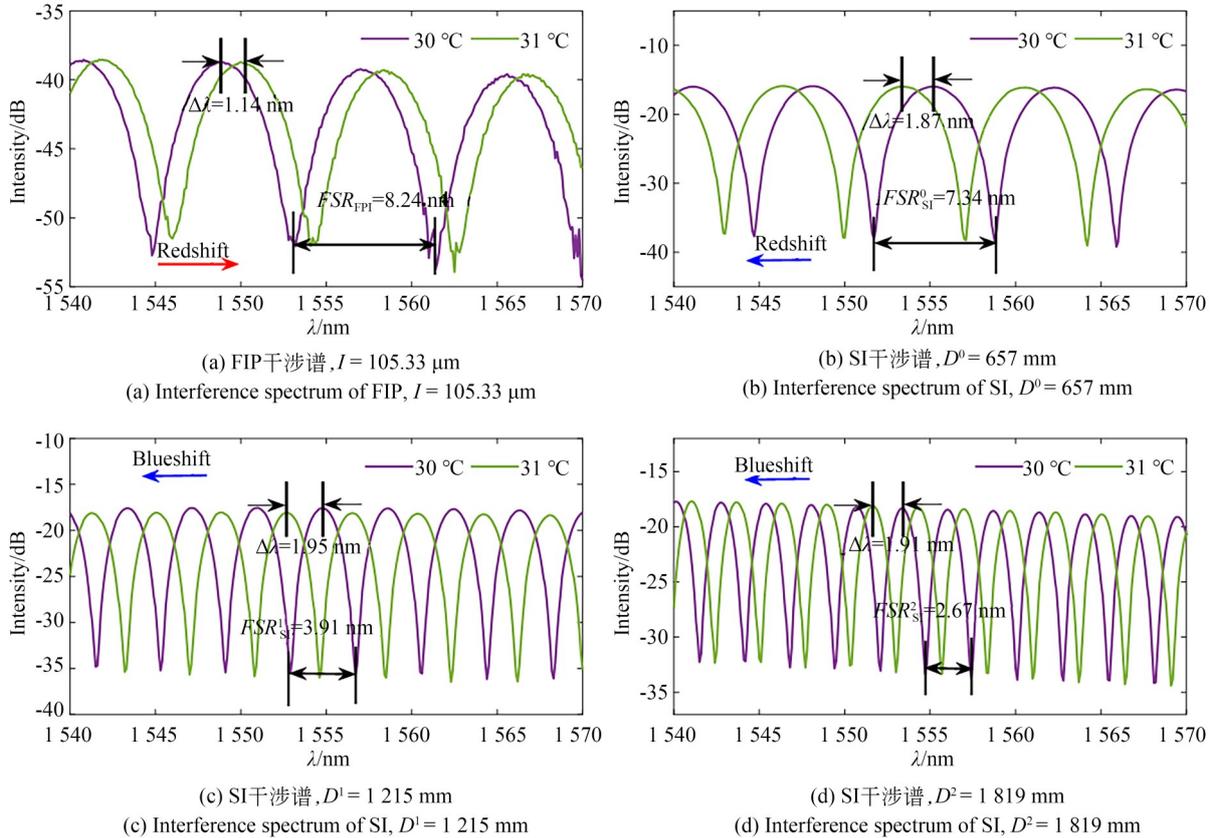


图 5 单个 FPI 和 SI 位移光谱

Fig. 5 Displacement spectrograms for single FPI and SIs

图 6 为 30 °C 和 31 °C 时,不同熊猫光纤长度的 SI 与 FPI 级联干涉谱。由图可知,当熊猫光纤长度分别为  $D^0=657$  mm、 $D^1=1 215$  mm、 $D^2=1 819$  mm 时,级联干涉谱中分别出现单包络、双包络和三包络,表明 SI 和 FPI 级联产生了 0 阶、1 阶、2 阶增强型谐波游标效应。当温度由 30 °C 增加到 31 °C 时,单包络、双包络和三包络分别向短波方向移动,与单个 SI 的移动方向相同,移动量分别为 33.65, 32.11 和 34.85 nm。由式 (7) 可知,当  $FSR_{FPI} > (i+1)FSR_{SI}^i$  时,单包络、双包络和三包络与单个 SI 具有相同的移动方向。以上实验结果与仿真结果一致。

图 7 为不同熊猫光纤长度的 SI 干涉谱峰值

随温度的变化曲线。拟合结果表明,在 30~35 °C 内,当熊猫光纤长度分别为  $D^0=657$  mm,  $D^1=1 215$  mm 和  $D^2=1 819$  mm 时,SI 的温度灵敏度几乎相同,分别为  $-1.94$ ,  $-1.93$  和  $-1.96$  nm/°C, 表明 SI 的温度灵敏度与熊猫光纤长度无关,该结果与仿真结果基本吻合。FPI 干涉谱峰值随温度的拟合结果表明,在 30~35 °C 内,1 550 nm 附近 FPI 的温度灵敏度为 1.14 nm/°C。该结果略高于理论计算结果,原因是材料参数差异,实验中 PDMS 的热光系数和热膨胀系数与理论假设之间存在差异。

图 8 表示在 30~35 °C 内,不同熊猫光纤长度的 SI 与 FPI 级联干涉谱随温度的变化曲线。拟

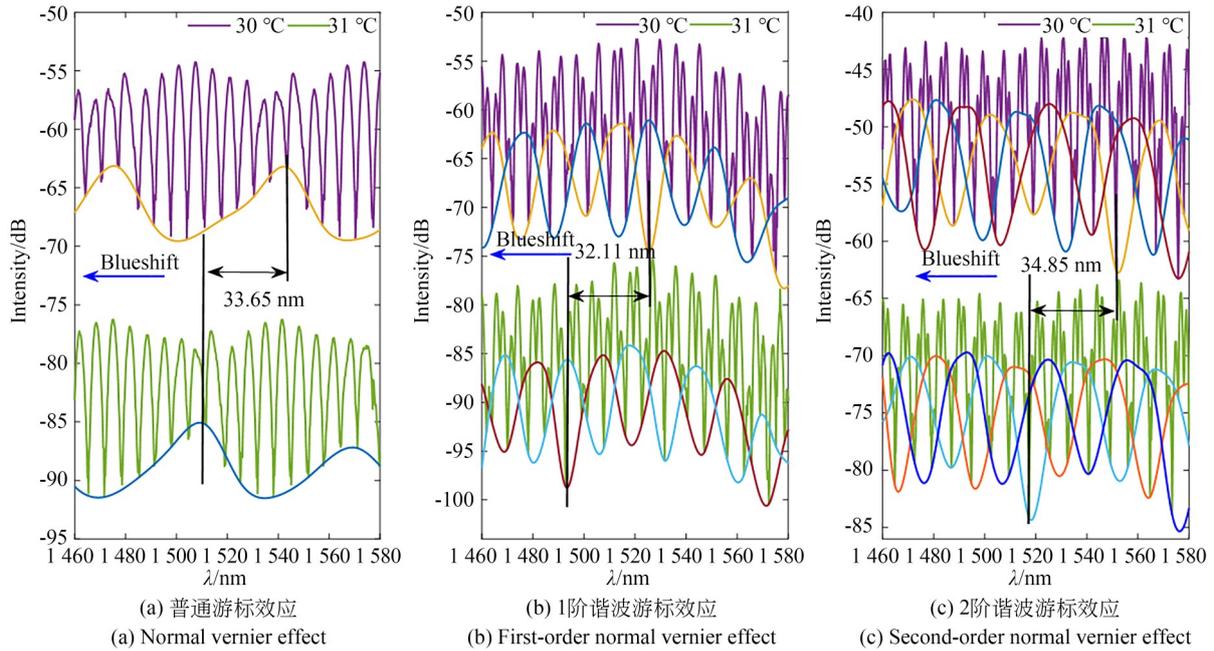


图 6 级联 SI 和 FPI 在 30~31 °C 的光谱位移

Fig. 6 Spectral shifts of cascade SI and FPI at 30 °C to 31 °C

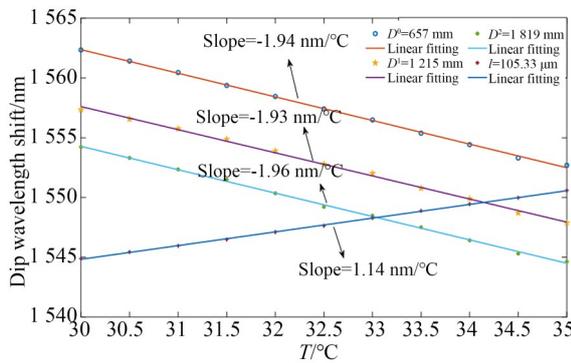


图 7 SI 和 FPI 干涉谱峰值波长随温度的变化曲线

Fig. 7 Peak wavelength of SI and FPI interference spectra varies with temperature

合结果表明,升温时单包络、双包络和三包络的温度灵敏度分别为 $-31.06$ 、 $-33.21$ 和 $-34.29$   $\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,说明增强型普通游标效应(0阶)与增强型1阶和2阶谐波游标效应具有近似相同的温度灵敏度。该结果略高于仿真结果,主要原因是实验材料与仿真数据存在差异。将以上实验结果代入式(7),计算可知 $M_1^0=27.2$ , $M_1^1=29$ , $M_1^2=30.1$ , $M_2^0=16.0$ , $M_2^1=17.2$ , $M_2^2=17.5$ ,表明级联后传感器的实际灵敏度分别均约为单个 FPI 和单个 SI 的 28.7 倍和 16.9 倍,分别均约为普通

谐波放大倍率的 3.4 倍( $\overline{M}_1^i=8.4$ )和 1.8 倍( $\overline{M}_2^i=9.4$ ),可见级联后灵敏度明显高于普通谐波游标效应。

为了验证传感器的稳定性,本文进行了传感器的升温和降温实验,结果如图 8 所示。为了更加清晰直观,这里所有的降温实验数据均减小 4 nm。实验数据拟合结果表明,升温和降温过程单包络的温度灵敏度分别约为 $-31.06$ 和 $-31.12$   $\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,双包络的温度灵敏度分别约为 $-33.21$ 和 $-33.31$   $\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,三包络的温度灵敏度分别约为 $-34.29$ 和 $-34.34$   $\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。对比升温和降温过程发现,升温和降温过程中传感器的灵敏度几乎相同,表明传感器具有很好的稳定性。

重复图 4 所示的 SI 与 FPI 制备过程,对相同长度参数的传感器样品进行测量,实验结果如图 9 所示。FPI 和 SI 的自由光谱范围与前文中干涉计的 FSR 接近( $FSR_{\text{FPI}} \approx 8.24$   $\text{nm}$ , $FSR_{\text{SI}}^0 \approx 7.30$   $\text{nm}$ , $FSR_{\text{SI}}^1 \approx 3.85$   $\text{nm}$ , $FSR_{\text{SI}}^2 \approx 2.66$   $\text{nm}$ ), FPI 的光程不变,增强型谐波游标效应的放大倍率与熊猫光纤的长度无关,仅与其长度失谐量有关,所以将 FPI 分别与 SI 级联,所得频谱图

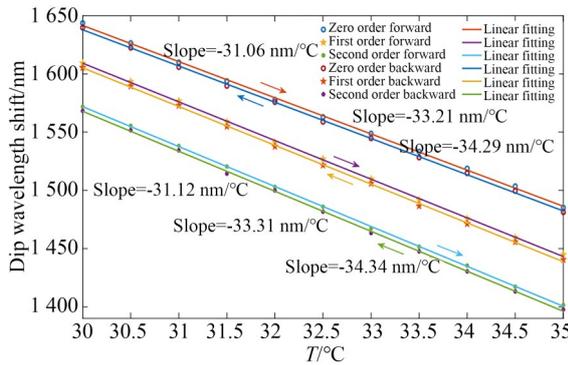


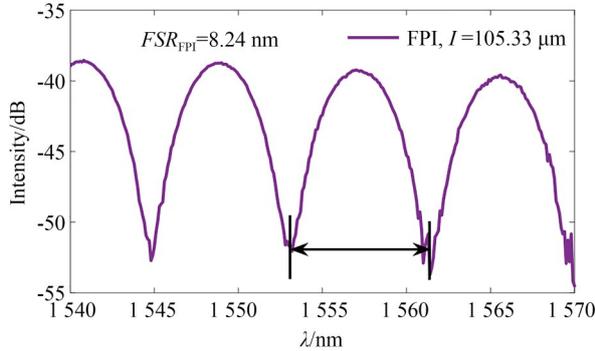
图8 不同熊猫光纤长度的SI与FPI级联干涉谱随温度的变化曲线

Fig. 8 Temperature curves of SI and FPI cascaded interference spectra with different panda fiber lengths

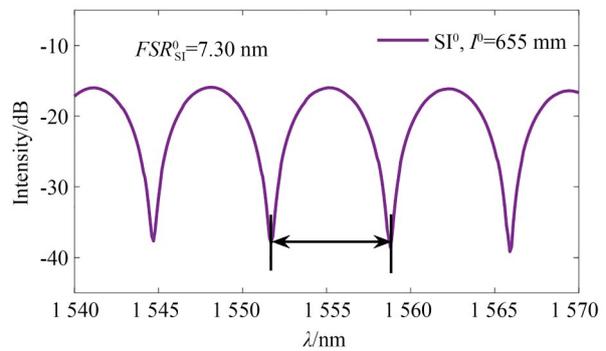
与前文结果一致,表明此传感器的制作工艺具有可靠性。

基于游标效应的光纤温度传感器性能对比如表1所示。本传感器中不同熊猫光纤长度的

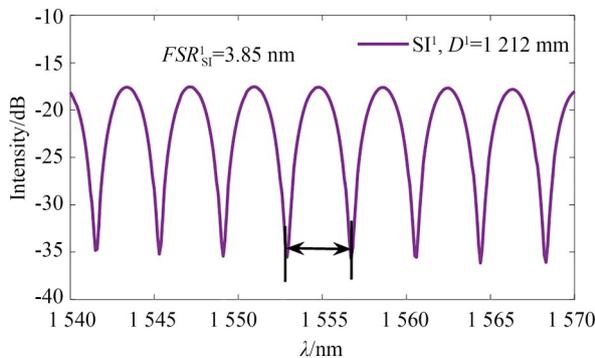
SI与FPI级联后,由于SI和FPI对温度都敏感且具有相反的响应,分别产生了增强型普通游标效应和增强型1阶、2阶谐波游标效应。文献[19]中提出了一种由两个平行的FPI组成的新型传感器,利用游标效应改善温度灵敏度,其温度灵敏度的放大倍率小于本传感器。文献[20]是基于增强型普通游标效应的光纤温度传感器,虽然获得了较高的灵敏度,但两干涉计的自由光谱范围受1倍关系的限制,游标效应设计的自由度降低。文献[21]是基于一个FPI和一个迈克尔逊干涉仪混合的紧凑谐波游标效应光纤温度传感器,并在悬浮芯光纤气腔中填充PDMS,虽然获得了较高的灵敏度,但并未对二次及以上谐波游标效应传感器进行温度实验。该传感器中增强型1阶和2阶谐波游标效应的失谐量明显大于增强型普通游标效应,因此,本传感器的制备难度低于增强型普通游标效应。



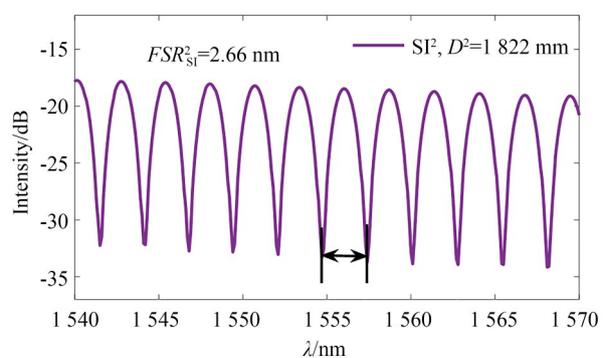
(a) FIP干涉谱,  $I = 105.33 \mu\text{m}$   
(a) Interference spectrum of FIP,  $I = 105.33 \mu\text{m}$



(b) SI干涉谱,  $D^0 = 655 \text{ mm}$   
(b) Interference spectrum of SI,  $D^0 = 655 \text{ mm}$



(c) SI干涉谱,  $D^1 = 1212 \text{ mm}$   
(c) Interference spectrum of SI,  $D^1 = 1212 \text{ mm}$



(d) SI干涉谱,  $D^2 = 1822 \text{ mm}$   
(d) Interference spectrum of SI,  $D^2 = 1822 \text{ mm}$

图9 传感器样品光谱

Fig. 9 Spectrograms of sensors sample

表 1 基于游标效应的温度传感器性能参量对比

Tab. 1 Comparison of temperature sensor performance parameters based on vernier effect

Vernier effect	$D^i$ /mm	$FSR_{SI}$ /nm	$M_1^i$	$M_2^i$	$S_{SI}$ /(nm·°C <sup>-1</sup> )	$S_{envelope}^i$ /(nm·°C <sup>-1</sup> )	$\Delta D^i$ /mm	Sensitivity/ (nm·°C <sup>-1</sup> )	Ref.
0th	657	7.34	17.99	29.52	1.94	31.06	-64	-14.633	[19]
1st	1 215	3.91	16.47	28.17	1.93	33.21	-128	15.34	[20]
2nd	1 819	2.67	18.25	30.57	1.96	34.29	-243	168.9	[21]

## 4 结 论

本文提出一种基于增强型谐波游标效应的光纤温度传感器,该传感器由对温度均敏感的SI和FPI级联构成,两干涉计具有相反的温度响应,且FPI的自由光谱范围约为SI的整数倍,级联产生增强型谐波游标效应。实验结果表明,在30~35 °C内,增强型普通游标效应与增强型1阶、2阶谐波游标效应具有几乎相同的温度灵敏度,均约为-32.85 nm/°C,约为单个

FPI和单个SI的28.7倍和16.9倍,约为普通谐波游标放大倍率的3.4倍和1.8倍。此外,增强型普通游标效应对应的熊猫光纤长度失谐量为-64 mm,而增强型1阶和2阶谐波游标效应对应的失谐量分别为-128 mm和-243 mm,由于失谐量越大,游标放大倍率越容易调控,因此,增强型谐波游标效应优于增强型普通游标效应。该传感器具有灵敏度高、制备难度低等优点,在高精度温度检测方面具有良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] LU P, LALAM N, BADAR M, *et al.* Distributed optical fiber sensing: review and perspective [J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(4): 041302.
- [2] APRIYANTO H, RAVET G, BERNAL O D, *et al.* Comprehensive modeling of multimode fiber sensors for refractive index measurement and experimental validation [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 5912.
- [3] ZHANG Y L, WU Y F, HAN Y, *et al.* High sensitivity strain sensor based on a novel offset-core single micro-tapered fiber-optic Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 73: 103012.
- [4] LIN S Y, ZHANG Y D, QU Y C, *et al.* A miniature high-temperature fiber-optic sensor based on tip-packaged Fabry-Perot interferometer [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 350: 114122.
- [5] 王永光. 基于光纤干涉计的温度传感器研究[D]. 黑龙江:哈尔滨理工大学,2020.  
WANG Y G, *Research on Temperature Sensor of Optical Fiber Interferometer* [D]. Heilongjiang: Harbin University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [6] LIU J, NAN P Y, TIAN Q, *et al.* Sensitivity enhanced strain sensor based on two-arm Vernier effect [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(8): 375-378.
- [7] LIAO H, LU P, FU X, *et al.* Sensitivity amplification of fiber-optic in-line Mach-Zehnder Interferometer sensors with modified Vernier-effect [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 26898-26909.
- [8] ZHANG P, TANG M, GAO F, *et al.* Cascaded fiber-optic Fabry-Perot interferometers with Vernier effect for highly sensitive measurement of axial strain and magnetic field [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19581-19588.
- [9] YANG Y Q, WANG Y G, ZHAO Y X, *et al.* Sensitivity-enhanced temperature sensor by hybrid cascaded configuration of a Sagnac loop and a F-P cavity [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33290-33296.
- [10] 俞夏雨奇,赵春柳,王家辉,等. 基于游标效应的双MZI温度传感理论研究[J]. 光通信技术,2018,42(01): 24-27.  
YU X Y Q, ZHAO CH L, WANG J H, *et al.* Theoretical study of dual MZI temperature sensing based on vernier effect [J]. *Optical Communication Technology*, 2018,42(01): 24-27. (in Chinese)
- [11] GOMES A D, FERREIRA M S, BIERLICH J, *et al.* Optical harmonic Vernier effect: A new tool for high performance interferometric fiber sensors [J]. *Sensors*, 2019, 19(24): 5431.

- [12] GOMES A D, FERREIRA M S, BIERLICH J, *et al.* Hollow microsphere combined with optical harmonic Vernier effect for strain and temperature discrimination [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 127: 106198.
- [13] 杨玉强, 李雨婷, 牟小光, 等. 基于 SI 和 FPI 级联谐波游标效应的光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2023, 1(15): 0258-7025  
YANG Y Q, LI Y T, MU X G, *et al.* Fiber optic temperature sensor based on the harmonic vernier effect of SI and FPI cascades[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 1(15): 0258-7025. (in Chinese)
- [14] 杨玉强, 张钰颖, 李雨婷, 等. 基于 Sagnac 干涉计谐波游标效应的光纤温度传感器[J]. *光子学报*, 2023, 1(10): 1004-4213.  
YANG Y Q, ZHANG Y Y, LI Y T, *et al.* Fiber optic temperature sensor based on the harmonic vernier effect of the Sagnac interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 1(10): 1004-4213. (in Chinese)
- [15] LANG C P, LIU Y, LIAO Y Y, *et al.* Ultra-sensitive fiber-optic temperature sensor consisting of cascaded liquid-air cavities based on Vernier effect [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(10): 5286-5291.
- [16] LUO W D, CAO Z G, ZHANG G S, *et al.* A highly sensitive optical fiber temperature sensor based on the enhanced Vernier effect[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 67: 102702.
- [17] MU X G, GAO J L, YANG Y Q, *et al.* Parallel polydimethylsiloxane-cavity fabry-perot interferometric temperature sensor based on enhanced vernier effect[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(2): 1333-1337.
- [18] 高佳乐, 杨玉强, 牟小光, 等. 基于增强型游标效应的光纤温度传感器[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(24): 3531-3539.  
GAO J L, YANG Y Q, MU X G, *et al.* Optical fiber temperature sensor based on enhanced vernier effect [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(24): 3531-3539. (in Chinese)
- [19] ZHANG S Y, JIANG C, REN J, *et al.* High-Sensitivity Temperature Sensor Based on Two Parallel Fabry-Pérot Interferometers and Vernier Effect [J]. *Journal of Russian Laser Rese-arch*, 2022, 43(3): 319-327.
- [20] LIU S, LU G W, LV D Y, *et al.* Sensitivity enhanced temperature sensor with cascaded Sagnac loops based on harmonic Vernier effect[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 66: 102654.
- [21] YANG W L, PAN R, ZHANG L Y, *et al.* Highly sensitive fiber-optic temperature sensor with compact hybrid interferometers enhanced by the harmonic Vernier effect[J]. *Optics Express*, 2023, 31(9): 14570.

## 作者简介:



林子曦(2002—),男,广东汕头人,主要从事光纤温度传感技术的研究。E-mail: 2721328099@qq.com

## 通讯作者:



李依潼(1988—),女,吉林辽源人,博士研究生,2010年、2013年于东北电力大学分别获得学士和硕士学位,主要从事光学传感与检测技术的研究。E-mail: liyitongfly@163.com

## 通讯作者:



杨玉强(1977—),男,山东德州人,博士,教授,博士生导师,2002年于东北师范大学获得学士学位,2004年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光学传感与检测技术的研究。E-mail: yuqiangy110@sina.com