

# 基于游标效应的双 MZI 温度传感理论研究

俞夏雨奇, 赵春柳, 王家辉, 应云斌, 李 磬

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

**摘要:** 光纤传感器的灵敏度是一个重要指标。设计了一种基于游标效应的双马赫-曾德尔干涉仪(MZI)温度传感器, 该传感器由两个臂长差相差不大的 MZI 级联构成。从理论上详细研究了利用游标效应提高传感器灵敏度的方法。模拟结果表明: 传感器加热区越长, 灵敏度越高; 当传感干涉仪臂长差小于参考干涉仪臂长差时, 包络曲线波峰将随着温度升高向短波方向移动, 反之, 向长波方向移动; 游标效应可大幅提升传感器的灵敏度, 当臂长差差值在 0.01mm 时, 灵敏度可提高 100 余倍。

**关键词:** 光纤光学; 马赫-曾德尔干涉仪; 游标效应; 光纤传感; 温度传感; 级联

**中图分类号:** O433.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1002-5561(2018)01-0024-04

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.01.007

## Double Mach-Zehnder interferometer temperature sensor based on vernier effect

YUXIA Yuqi, ZHAO Chunliu, WANG Jiahui, YING Yunbin, LI Die

(School of Optic and Electronic Technology,

China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Sensitivity is an important parameter of optical fiber sensor, this paper designs a double Mach-Zehnder interferometer(MZI) temperature sensor based on vernier effect, the sensor consists of two cascaded MZI with similar arm difference. It studies the method of using vernier effect to improve sensor sensitivity in detail. Theoretical simulative results show when the heating area becomes longer, the sensitivity of the sensor will get more improvement. Besides, when the arm difference of sensor interferometer is shorter than the arm difference of another interferometer, the envelope curve will move in the direction of short wavelength, otherwise, move in the direction of long wavelength. The vernier effect can greatly enhance the sensitivity of the sensor, when the length difference between the arms is 0.01mm, the sensitivity can be increased by 100 times.

**Key words:** fiber optic; MZI; vernier effect; fiber optic sensor; temperature sensor; cascading

### 0 引言

光纤传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰、本质安全、易分布和长距离传感测量等优点, 已引起人们的广泛关注。其中, 马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI) 凭借其能抑制光源噪声和模式噪声的特点, 在高精度测量中越来越受到重视, 使用 MZI 能对多种物理量进行传感测量, 如温度、压力、折射率、磁场、电流和超声波等<sup>[1-3]</sup>。

游标效应最初应用于提高长度测量的分辨率(如

游标卡尺), 其工作原理在于巧妙利用主尺与游标的微小比例尺差异。2009 年, Dai<sup>[4]</sup>和 Jin 等人<sup>[5]</sup>分别提出基于串联光纤环结构的游标效应光学传感器, 利用波长解调法实现折射率的超高灵敏度测量。2014 年, Zhang 等人<sup>[6]</sup>提出利用空心光子晶体光纤(HC-PCF)的大模场特性将两段 HC-PCF 嵌入单模光纤(SMF)中, 构成级联法布里-珀罗干涉仪(FPI)结构的游标效应光纤传感器(两个 FPI 相距数厘米), 将其应用于应力和磁场的测量, 较之单一 FPI, 该传感器的灵敏度提高了约 29 倍。2015 年, Shao 等人<sup>[7]</sup>提出串联 Sagnac 干涉仪的游标效应光纤温度传感器, 较之单一 Sagnac 干涉仪, 其灵敏度提高了约 9 倍。但是, 目前尚无任何基于游标效应的 MZ 光纤传感器的研究报道。因此, 本文在

收稿日期: 2017-09-14。

基金项目: 浙江省新苗计划(2017R409034)资助; 浙江省自然科学基金(LY17F050010)资助。

作者简介: 俞夏雨奇(1996-), 男, 本科, 主要研究方向光纤传感技术。

理论上对基于游标效应的双MZI温度传感器进行详细研究。

## 1 基本原理分析

### 1.1 基于游标效应的双MZI传感器的结构和工作原理

基于游标效应的

双MZI温度传感器结构如图1所示。两个3dB耦合器相互连

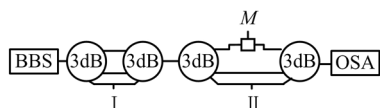


图1 双MZI温度传感器示意图

接构成I,控制耦合器两臂之间差值尽量小,由于两臂存在光程差,因此I构成一个MZI,称其为参考干涉仪。用同样的方法在I后面级联两个臂长有些许差值的3dB耦合器构成II,构成第二个MZI。控制两个MZI的臂长差差值相差较小。当该结构作为温度传感器时,将温度作用于第二个MZI的一个臂上,即图1中M处,受热长度为 $L_M$ ,其所在臂为传感臂,另一个作为参考臂,此时称结构II为传感干涉仪。

### 1.2 单个MZI的温度传感特性分析

当宽带光源(Broadband Source, BBS)的光经过具有传感区域的单个MZI后直接进入光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)时(即图1中仅当结构II存在),为考虑温度变化对光纤相位产生的影响,本文对长度为 $L_M$ 的传感区域M进行均匀加热,装置其它部分保持温度不变。光纤受热膨胀后,M段的光纤长度与直径同时发生变化,已有研究证实,光纤因温度变化引起的直径变化是可以忽略的。因此,我们只需考虑光纤长度随温度的变化,采用相关的热膨胀系数 $\alpha^{[8]}$ 来描述。另外,由于光纤的热光效应,随着温度变化,M段的折射率也会发生改变,本文引用热光系数 $\xi^{[8]}$ 进行描述。至此,单个MZI相位差可以近似表示为:

$$\delta_b = \frac{2\pi}{\lambda} [n_0 \cdot \Delta L_b + (\xi + \alpha) \cdot \Delta T n_0 L_M] \quad (1)$$

其中, $\Delta L_b$ 为结构II所示传感干涉仪的两臂臂长差, $\lambda$ 为工作波长, $n_0$ 表示初始温度下的光纤有效折射率, $\Delta T$ 表示温度变化量。由式(1)可知,当温度变化后,MZI的相位差也随之改变,某波长下的谱线峰值随之移向长波或短波方向,其透射谱线在OSA屏幕中出现平移现象,这种随温度升高或降低产生的透射谱线平移程度就是该传感器的温度传感灵敏度。在实际测量中,人们多通过观测某个固定级数波峰波谷的平移来确定平移程度。因此,本文通过观测某个固定级数的波峰 $\lambda_q$ (包括后文中的包络线波峰 $\lambda_k$ )平移来研究MZI透射谱特性。

通过分析光纤MZI的温度传感特性,可以得到单个MZI的温度传感灵敏度 $S_T$ 为:

$$S_T = \frac{\partial \lambda_q}{\partial \Delta T} = \frac{(\xi + \alpha) \cdot n_0 \cdot L_M}{q} \quad (2)$$

其中, $q$ 代表所观测的固定波峰级数,由 $\delta_b = 2\pi q$ 确定。

### 1.3 基于游标效应的双MZI温度传感特性分析

我们在传感干涉仪II前连接参考干涉仪I,构成级联的两个MZI,仍令M处为加热区域。宽带光源发出的光经过双MZI结构后,在OSA中得到透射光的叠加干涉谱。该干涉谱可视为一束光分别经过参考干涉仪与传感干涉仪后的干涉谱线叠加,因为参考干涉仪与传感干涉仪具有不同的臂长差,所以两者的干涉谱线具有不同的空间频率 $f_1, f_2$ ,导致最后产生的叠加干涉谱会产生类似光学中的“拍”现象,即同时满足两个干涉仪出射光强最强处的波长对应叠加干涉谱中的最大值,反之对应最小值,这也是叠加干涉谱包络线中的波峰与波谷。包络线、参考干涉仪干涉谱和传感干涉仪干涉谱的波峰级数分别用 $k, p$ 和 $q$ 表示,实际应用中这3者数值是不同的。

通过分析叠加干涉光谱可知,参考干涉仪和传感干涉仪的某个相同波峰波长所对应的波峰级数差 $p-q$ 能代表其叠加干涉谱包络线的某个波峰级数。该差值每变化1,意味着组成包络线波峰的两个干涉谱波峰又交错了一个,即包络线的下一个波峰。因此,该波峰级数差可以用来表征叠加干涉谱包络线的波峰级数 $k$ 。通过推导可得透射光的叠加干涉谱包络线上的波峰波长 $\lambda_k$ 为:

$$\lambda_k = \frac{n_0 \cdot [\Delta L_b - \Delta L_a + (\xi + \alpha) \cdot \Delta T L_M]}{k} \quad (3)$$

其中, $\Delta L_a$ 和 $\Delta L_b$ 分别为参考干涉仪臂长差和传感干涉仪臂长差。从式(3)可以得到当温度变化 $\Delta T$ 时,某一个固定包络线波峰级数 $k$ 下的波长变化量。因此,对式(3)求导可以得到叠加干涉谱包络线波峰的温度灵敏度 $S_{T-envelope}$ 为:

$$S_{T-envelope} = \frac{\partial \lambda_k}{\partial \Delta T} = \frac{(\xi + \alpha) \cdot n_0 \cdot L_M}{k} \quad (4)$$

对比式(4)和式(2),其区别在于分母上的干涉级数不同,当传感干涉仪与参考干涉仪的臂长差差值相差不大时,波峰级数差的值(即前文定义的包络线波峰级数)将远小于传感干涉仪的波峰级数。因此,通过合理搭配两干涉仪的臂长差差值,便能获得呈现倍率提升的温度传感灵敏度,这是双MZI温度传感器结构的巧妙之处。

## 2 理论模拟结果和特性研究

### 2.1 单 MZI 和双 MZI 的灵敏度对比研究

本文通过 Matlab 软件分别对单 MZI 和双 MZI 温度传感器进行理论模拟。在环境温度为 30℃ 时,设初始状态的光纤有效折射率  $n_0=1.468$ ,热光系数  $\xi \approx 8.3 \times 10^{-6}$ ,热膨胀系数  $\alpha \approx 0.55 \times 10^{-6}$ ,加热区域长度  $L_M=2\text{cm}$ ,单 MZI 和双 MZI 的传感干涉仪臂长差  $\Delta L_b=1\text{mm}$ ,双 MZI 的参考干涉仪臂长差  $\Delta L_a=1.1\text{mm}$ 。对工作波长为 1550nm 附近的光进行模拟,单 MZI 温度传感器和双 MZI 温度传感器的模拟结果分别如图 2 和图 3 所示。

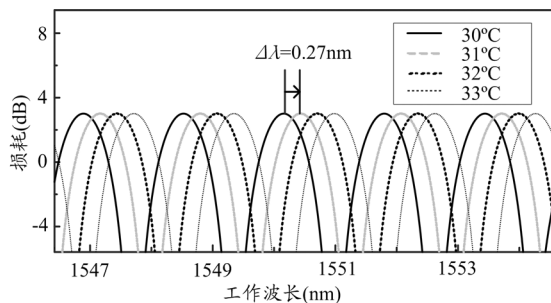


图 2 单一 MZI 的温度响应特性

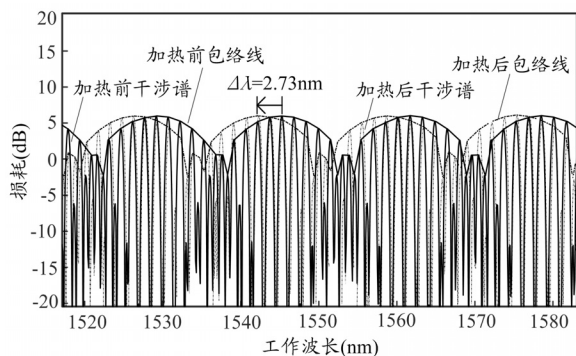


图 3 双 MZI 结构的温度响应特性

从图 2 可以看出,随着温度升高,谱线向长波方向移动。同时,温度每变化 1℃,波长的移动量约为 0.27nm。图 3 中,加热后温度由 30℃ 升高到 31℃,可以看出,升温后的干涉谱包络向左移动了 2.73nm,该移动量是单 MZI 的 10.1 倍。经计算单 MZI 温度传感器的灵敏度约为 0.27nm/℃,双 MZI 温度传感器的灵敏度约为 2.73nm/℃,由此可见运用双 MZI 产生的游标效应进行解调获得的灵敏度较之单 MZI 的灵敏度具有显著提升。

### 2.2 不同 $L_M$ 对双 MZI 温度传感器灵敏度的影响

假设其它实验条件与前文一致,我们取加热区域长度  $L_M$  分别为 1cm、2cm、3cm 和 4cm 时,对双 MZI 温度传感器进行模拟,工作波长主要在 1550nm 附近,得到的结果如图 4 所示。

从图 4

可以看出,

$L_M=4\text{cm}$  时的

温度灵敏度

约 5.47nm/℃,

$L_M=1\text{cm}$  时温

度灵敏度约

1.37nm/℃,前

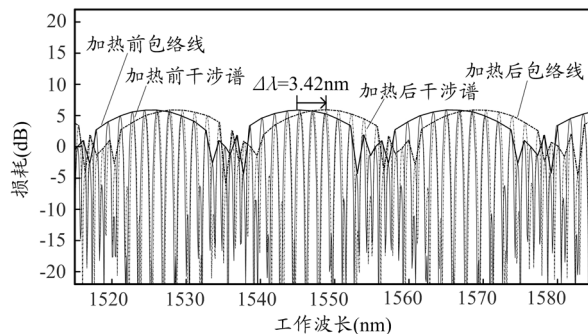
者比后者高出了

4.10nm/℃。由此可知,在条件允许的情况下,应尽量提升传感器的感温区域长度  $L_M$ ,从而获得更高的温度灵敏度。

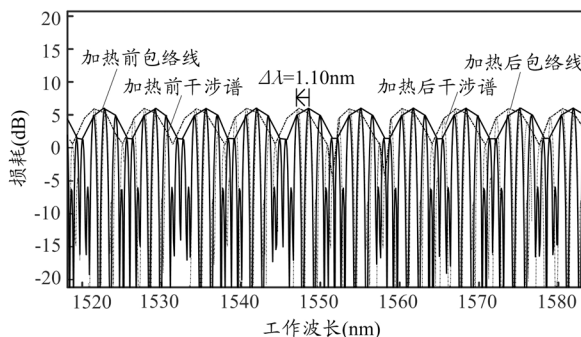
### 2.3 两个 MZI 臂长差的差值对 MZI 温度传感器灵敏度的影响

为更好地研究臂长差差值对灵敏度的影响,我们将  $L_M$  选为 2cm,实验其它条件不变,引入臂长差的差值  $d=\Delta L_b-\Delta L_a$ 。当  $d$  的绝对值较大时,两个干涉仪的自由光谱范围差距较大,不易产生游标效应。因此,本文选取  $d$  不同的几种情况进行模拟,温度从 30℃ 升高到 31℃,工作波长控制在 1550nm 附近,得到双 MZI 温度传感器的叠加干涉谱及其包络拟合结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,温度升高后,包络曲线相较原叠加干涉谱出现明显移动,且  $d$  绝对值越小包络曲线移动越明显。因此,用游标效应解调得到的包络曲线波峰波长移动也越明显,例如同样在温度上升 1℃ 后,



(a)  $d=0.08\text{mm}$



(b)  $d=-0.25\text{mm}$

图 5 模拟计算得到的叠加干涉谱及其包络拟合结果

$d=0.08\text{mm}$  的传感器比  $d=-0.25\text{mm}$  的传感器波峰波长多改变了  $2.32\text{nm}$ 。

另外,比较图 5(a)和图 5(b)可以看出,两者包络线波峰波长随温度升高的移动方向正好相反,即当  $d<0$  时,包络曲线的波峰随着温度的上升向短波方向偏移;当  $d>0$  时,包络曲线的波峰随着温度的上升向长波方向偏移。我们再看图 3 中的模拟结果,当双 MZI 温度传感器的  $d=-0.1\text{mm}$  时,包络曲线随着温度升高向短波方向移动,温度灵敏度为负值。这是因为当  $d<0$  (即  $\Delta L_a>\Delta L_b$ ) 时,由式(3)得出  $k<0$ ,将此  $k$  值代入式(4)得到包络曲线波峰的温度灵敏度  $S_{T\text{-envelope}}<0$ 。同理,当  $d>0$  (即  $\Delta L_a<\Delta L_b$ ) 时,  $S_{T\text{-envelope}}>0$ 。因此,在一些基于游标效应的传感装置实验中,包络线波峰的红蓝移动主要取决于构成装置结构的传感部分与参考部分臂长差的相对长短。

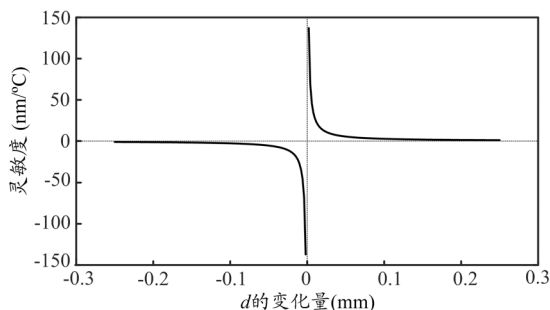


图 6 不同  $d$  下的传感器灵敏度变化情况

$d$  与传感器灵敏度的关系曲线如图 6 所示。可以看出,当  $d$  的绝对值从大到小变化时,游标效应越明显,传感器灵敏度越来越高,且呈对称关系,即当  $d$  仅改变符号时,灵敏度也只改变符号。假设实验中所用的宽带光源的工作波长范围为  $1430\sim 1630\text{nm}$ ,选定传感器的工作波长在  $1550\text{nm}$  附近的波峰进行观测,当该波峰因温度变化移动到工作波长外时,视作当前温度超出传感器此时的测温范围。由此可见,当传感器灵敏度提高时,其测温范围随之减小,例如,当  $d=0.02$  时,  $S_{T\text{-envelope}}=13.72\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,此刻的测温范围为  $22^\circ\text{C}\sim 35^\circ\text{C}$ ;当  $d=0.01$  时,  $S_{T\text{-envelope}}=27.43\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,此刻的测温范围为  $26^\circ\text{C}\sim 32^\circ\text{C}$ ,较之  $d=0.02$  时测温范围减小了  $7^\circ\text{C}$ 。

综合以上结果可知,当加热区域  $M$  所在的干涉仪(即传感干涉仪)臂长差大于第一个干涉仪臂长差时,包络曲线的波峰随温度升高向长波方向移动;反之,向短波方向移动。另外,臂长差差值  $d$  的绝对值越小,传感器灵敏度就越高,例如,当  $d=0.01$  时,  $S_{T\text{-envelope}}=27.43\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,是同样加热长度单 MZI 传感器灵敏度的 101.6 倍。

### 3 结束语

本文在理论上详细研究了一种结构简单、具有高灵敏度的双 MZI 温度传感器。本传感器由两个 MZI 级联构成,精确控制两个 MZI 的光程差,使两个干涉仪具有相近的自由光谱区,可以叠加光谱产生游标效应。我们通过理论模拟研究可以得出以下结论:①利用游标效应解调能大幅提高传感器灵敏度,当两个干涉仪的臂长差差值  $d=\pm 0.01$  时,该传感器用游标效应解调获得最大灵敏度  $27.43\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,较之单一 MZI 提高了 100 多倍。②当传感干涉仪的臂长差小于参考干涉仪臂长差时,游标效应解调后的包络曲线波峰波长将随着温度升高而向短波方向移动;反之,向长波方向移动。这成功解释了其它相关文献中干涉图样红移蓝移的原因。③当传感器加热区域越长时,传感器的灵敏度也越大。本研究在实现过程中可能会遇到基于光纤游标效应的传感器臂长差差值较难控制的情况,但在光波导结构中不存在该问题。本文的模拟结果一方面为基于游标效应的双 MZI 温度传感器实用化奠定了重要的理论基础,另一方面也为基于光波导集成的双 MZ 干涉型相关器件奠定了基础,确定了其可行性,并为该装置实用化时可能遇到的参数选择和优化问题提供了清晰的参考与帮助。

### 参考文献:

- [1] 莫徽忠. 基于 MZI 的多用途全光纤传感器设计 [J]. 光通信技术, 2014, 38(9): 25-27.
- [2] 兆雪, 邵敏, 乔学光, 等. 光纤锥在线型马赫-曾德干涉仪的折射率传感特性 [J]. 光子学报, 2016, 45(2): 88-92.
- [3] 张珊珊. 新型光纤 M-Z 干涉传感结构及特性研究 [D]. 天津: 南开大学, 2014.
- [4] DAOXIN DAI. Highly sensitive digital optical sensor based on cascaded high-Q ring-resonators [J]. Optics Express, 2009, 17(26): 23817-23822.
- [5] JIN L, LI M, HE J J. Highly-sensitive silicon-on-insulator sensor based on two cascaded micro-ring resonators with vernier effect [J]. Optics Communications, 2011, 284(1): 156-159.
- [6] ZHANG Peng, TANG Ming, GAO Feng. 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.
- [7] SHAO L Y, LUO Y, ZHANG Z, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on Vernier-effect [J]. Optics Communications, 2015(336): 73-76.
- [8] PENG Wei, ZHANG Xinpu, LIU Yun. Temperature characteristics of a core-mode interferometer based on a dual-core photonic crystal fiber [J]. Applied Physics B, 2014, 116(1): 21-26.