

文章编号: 1002-1582(2025)06-0729-07

# 基于双通道光纤传感器的海水温盐度测量的理论研究

廖毅鹏<sup>1\*</sup>, 何小勇<sup>2</sup>, 吴熙<sup>3,4</sup>

(1. 深圳信息职业技术大学 微电子学院, 广东 深圳 518172)

(2. 东莞理工学院 电信工程与智能化学院, 广东 东莞 523808)

(3. 南宁师范大学 广西信息功能材料与智能信息处理重点实验室, 广西 南宁 530004)

(4. 南宁师范大学 物理与电子学院, 广西 南宁 530004)

**摘 要:** 文章提出了一种双通道光纤传感器用于海水温盐度的准确测量。传感器利用光纤马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 和微光纤模式干涉仪 (MMI) 结构作为两个传感单元, 分别位于光开关的两个通道中, 通过建立两个传感单元光谱干涉峰波长与温盐度的关系实现温盐度的同步测量。研究了 MZI 和 MMI 的灵敏度特性, 通过优化结构参数, 建立了具有高灵敏度的传感器理论模型, 温盐度传感灵敏度最大值分别达  $-2.9307\text{nm}/^{\circ}\text{C}$  和  $-2.3098\text{nm}/\text{‰}$ 。对温盐度测量进行了仿真计算, 结果表明, 在  $0.1\text{nm}$  和  $0.02\text{nm}$  两个光谱分辨率下, 温度测量平均偏差分别为  $0.021^{\circ}\text{C}$  和  $0.0151^{\circ}\text{C}$ , 盐度平均偏差分别为  $0.0426\text{‰}$  和  $0.039\text{‰}$ 。双通道光纤传感器具有较高的测量准确度, 为海水温盐度测量提供了新思路。

**关 键 词:** 光纤传感器; 干涉仪; 微光纤; 温度; 盐度

中图分类号: TN253

文献标识码: A

## Theoretical study on seawater temperature and salinity measurement based on Dual-channel Fiber-optic sensor

LIAO Yipeng<sup>1\*</sup>, HE Xiaoyong<sup>2</sup>, WU Xi<sup>3,4</sup>

(1. School of Microelectronics, Shenzhen University of Information Technology, Shenzhen 518172, China)

(2. School of Electronic Engineering and Intelligentization, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

(3. Guangxi Key Laboratory of Information Functional Materials and Intelligent Information Processing, Nanning Normal University, Nanning 530004, China)

(4. School of Physics and Electronics, Nanning Normal University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** A dual-channel fiber-optic sensor-based method is proposed to accurately measure seawater temperature and salinity. A fiber-optic Mach-Zehnder interferometer (MZI) and a microfiber mode interferometer (MMI) are used as the sensing units in two channels of an optical switch, and thus the measurement of temperature and salinity can be realized by establishing the relation between the wavelength of spectral interference peak of two sensing units and temperature and salinity. By studying their sensitivity characteristics and optimizing structural parameters, a high-sensitivity sensor theoretical model is established, and the acquired highest sensitivity for temperature and salinity sensing are  $-2.9307\text{nm}/^{\circ}\text{C}$  and  $-2.3098\text{nm}/\text{‰}$ , respectively. Simulation of seawater temperature and salinity measurement process are carried out, and the results show that at spectral resolutions of  $0.1\text{nm}$  and  $0.02\text{nm}$ , the average temperature measurement deviations are  $0.021^{\circ}\text{C}$  and  $0.0151^{\circ}\text{C}$ , respectively, and the average salinity deviations are  $0.0426\text{‰}$  and  $0.039\text{‰}$ . The dual-channel fiber-optic sensor shows high measurement accuracy, providing a new idea for the measurement of seawater temperature and salinity.

**Keywords:** optical fiber sensor; interferometer; microfiber; seawater temperature; salinity

收稿日期: 2025-05-09; 收到修改稿日期: 2025-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62405052, 62204038); 广西自然科学基金项目 (2025GXNSFAA069379)

作者简介: 廖毅鹏 (1993—), 男, 讲师, 博士, 从事光纤传感器件及应用研究。

\* 通讯作者: liaoyp@szit.edu.cn

## 0 引 言

温度和盐度（下文简称“温盐度”）是海水的两个基本参数，是海水运动的重要驱动因素<sup>[1]</sup>，海水温盐度数据对于深入理解海洋内波<sup>[2]</sup>、涡旋<sup>[3]</sup>、环流<sup>[4]</sup>等海洋动力过程的空间结构、运动规律及其引起的物质和热量输运至关重要。目前，测量海水温盐度的主要方法是卫星遥感和现场观测<sup>[5]</sup>。卫星遥感可大范围、高频次获取海洋表层温盐度数据，但无法获取海洋深层温盐度数据。为了获取更为丰富的海洋三维温盐场信息，往往需要使用现场观测仪器。目前用于海水温盐度现场观测的主流仪器是电学设备，如温盐深仪（Conductivity-Temperature-Depth, CTD）等，这类设备较容易受电磁干扰，且由于体积较大、分立式探头结构和泵吸式进样方式的限制，其布放较为不便，同时还可能破坏海水温盐度分布的自然结构。

为了解决上述问题，学者们提出了利用光纤传感器用于海水温盐度的测量，已提出的传感器结构包括光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating, FBG）<sup>[6]</sup>、光纤表面等离子体共振传感器<sup>[7]</sup>、光纤干涉仪<sup>[8]</sup>等，它们具有简单小巧的结构和良好的性能，预示着光纤传感器在温盐度测量应用中的良好前景。一般来说，一个光纤传感器可以单独用于测量海水温度或盐度，例如：对于部分光纤温度传感器如FBG<sup>[9]</sup>、双折射光纤 Sagnac 干涉仪<sup>[10]</sup>来说，光与海水之间没有相互作用，它们仅依靠热传递引起光纤传感器本身的性质改变（如折射率和形状等）实现温度传感，由于盐度变化不能改变光纤传感器的性质，因此它们无法感知盐度变化；对于另一部分光纤传感器而言，温度或盐度变化均可改变波矢或相位匹配状态并导致光谱特征峰移动<sup>[11-13]</sup>，因此它们具有交叉敏感性，仅适用于单一参数变化的理想环境。为了实现海水温盐度的同步测量，一种可行的方法是光纤传感器的联合使用，例如：Liu 等和 Zhao 等均提出了包含了两个传感单元的级联式传感器结构<sup>[14,15]</sup>，两个传感单元对温盐度变化的响应存在差异，通过建立两个传感单元与温盐度变化的响应关系可以实现双参数的解调。然而，上述研究中对温盐度解调采用了测量矩阵算法，而海水折射率经验公式表明海水折射率与温度的关系不是线性的，尤其是在温度范围较大的情况下，这种非线性关系更为明显，且温度和盐度与海水折射率的关系并非相互独立，因此通过相互独立的线性关系建立测量矩阵并基于测量矩阵对温盐度解调存在较大偏差。

为此，Zheng 等建立了传感器对温度变化的非线性响应曲线，获得了超过 0.999 的拟合优度<sup>[16]</sup>。在之前的工作中，进一步考虑温度与盐度的交互作用，构建了更为严格的干涉峰波长与温度、盐度关系曲面，并基于此提出了温盐度的解调算法，其测量偏差显著小于测量矩阵算法<sup>[17]</sup>。然而，在上述研究中，虽然基于光纤马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer, MZI）的传感单元灵敏度较高，但是采用了一个灵敏度较低的法布里-珀罗干涉仪（Fabry-Pérot Interferometer, FPI）作为另一传感单元，由于光谱仪设备的分辨率有限，大多数干涉峰的位置并不能完全准确获得，因此标定时干涉峰位置不完全准确，且在测量时解调方程中所用干涉峰位置也不完全准确，对于低灵敏度传感器来说，干涉峰位置偏差的影响更为显著，因此即使拟合的关系曲面已经有了很高的拟合优度，测量偏差仍然较大。

在光谱测量分辨率一定时，提升传感器灵敏度可以减小干涉峰读取偏差的影响，进而减小温盐度的测量偏差。还需要注意的是，两个传感器单元均需要有较高的灵敏度，否则整体的测量准确度仍然会受制于较低的传感器单元。基于此构想，本文提出了一种双通道传感器用于海水温盐度测量，此系统中包含的两个传感器单元，分别 MZI 和微光纤模式干涉仪（Microfiber Mode Interferometer, MMI）结构，它们分别位于光开关的两个通道中。从理论上分别研究 MZI 和 MMI 的灵敏度特性，通过优化结构参数建立了具有高灵敏度的传感器理论模型。以此为基础，建立了干涉峰波长与温度、盐度的关系曲线与曲面。以关系曲线和曲面作为标定方程实现了温度、盐度的精确解调，探究了光谱分辨率对计算结果的影响，并将计算结果与已报道的传感器测量结果作了对比分析以评价其性能。

## 1 理论模型与优化

本文提出的双通道传感器及其系统示意图如图 1 所示。系统中包含一个宽带光源（Broadband Light Source, BLS）、两个光开关（Optical Switch, OS）、一个光谱仪（Optical Spectrum Analyzer, OSA）。两个传感器单元分别接在光开关的两个通道上，通过控制两个光开关，可以使得光谱仪获取任一通道的光谱，匹配光开关的打开时间和光谱仪的测量时间可以获取传感单元的完整光谱。通过依次获取通道 1 和通道 2 的光谱即完成了一次测量。

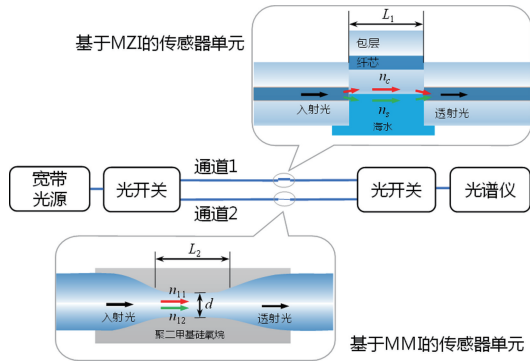


图1 双通道光纤传感器及其系统示意图

通道1接入的是一个基于MZI的传感器单元。该MZI可通过两次错位熔接制备而成<sup>[18]</sup>, 错位距离约为普通单模光纤直径的一半。在第一个错位熔接点处, 一部分入射光直接传输至错位光纤包层传输, 另一部分在第一个光纤-海水交界面发生反射和透射。透射光在海水中传输至第二个光纤-海水交界面并再次发生反射和透射, 由于光在光纤包层和海水中传输的折射率不同从而产生相位差, 当透射光与沿着包层传输的光均耦合至纤芯时, 积累的相位差产生干涉现象, 从而形成了一个MZI。MZI干涉特征峰的位置可表达如下<sup>[17]</sup>

$$\left(N + \frac{1}{2}\right)\lambda_z = (n_c - n_s)L_1 \quad (1)$$

式中,  $N$ 为干涉级次;  $\lambda_z$ 为干涉峰位置;  $n_c$ 和 $n_s$ 分别为包层和海水的折射率; 其与温度 $T$ 和盐度 $S$ 的关系为<sup>[19,20]</sup>

$$n_c = \left[ \frac{0.6961663}{1 - (68.4043/\lambda)^2} + \frac{0.4079426}{1 - (116.2414/\lambda)^2} + \frac{0.8974794}{1 - (9896.161/\lambda)^2} + 1 \right]^{1/2} + \xi(T - 20) \quad (2)$$

$$n_s = 1.31405 + \left( \frac{1.779 \times 10^{-4} - 1.05 \times 10^{-6}T}{+1.6 \times 10^{-8}T^2} \right) S - 2.02 \times 10^{-6}T^2 + \frac{15.868 + 0.01155S - 0.00423T}{\lambda} - \frac{4382}{\lambda^2} + \frac{1.1455 \times 10^6}{\lambda^3} \quad (3)$$

式中,  $\xi$  ( $1.13 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ) 是二氧化硅的热光系数。 $L_1$ 为错位熔接的光纤长度, 其表示为

$$L_1 = L_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (4)$$

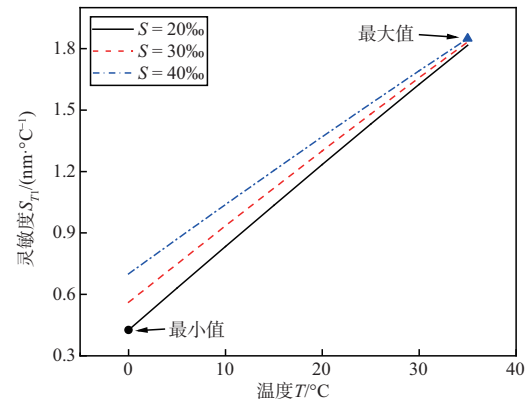
式中,  $\alpha$  ( $5.4 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ) 是二氧化硅的热延展系数<sup>[21]</sup>,  $L_0$ 是 $20^\circ\text{C}$ 时的光纤长度。当海水温度或盐度变化导致 $n_c$ 和(或) $n_s$ 变化, 由式(1)可知,

干涉光谱发生漂移。根据式(2)~(4)可知, 当海水温度升高时,  $n_c$ 增大,  $n_s$ 减小,  $L$ 增大, 因此MZI的光谱发生红移; 当海水盐度升高时,  $n_s$ 增大, 因此MZI的光谱发生蓝移。通过标定光谱移动量与温度或盐度变化量之间的关系并追踪光谱的移动可获得温度或盐度变化。对式(1)求微分, 可推导出基于MZI的传感器单元的温度传感灵敏度 $S_{T1}$ 和盐度传感灵敏度 $S_{S1}$ 关系式分别为

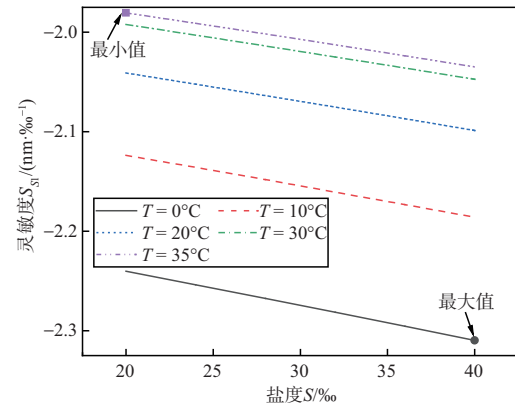
$$S_{T1} = \frac{d\lambda}{dT} = \frac{1}{(\Delta n)/\lambda - \partial(\Delta n)/\partial\lambda} \cdot \left( \frac{\partial(\Delta n)}{\partial T} + \alpha \cdot \Delta n \right) \quad (5)$$

$$S_{S1} = \frac{d\lambda}{dS} = \frac{1}{(\Delta n)/\lambda - \partial(\Delta n)/\partial\lambda} \cdot \frac{\partial(\Delta n)}{\partial S} \quad (6)$$

式中,  $\Delta n = n_c - n_s$ 。根据式(5)~(6)可知, 基于MZI的传感器单元的传感灵敏度仅与海水温盐度、探测波长相关, 与其自身结构参数无关, 因此其优化空间有限。计算1550nm波长处基于MZI的传感器单元的传感灵敏度, 如图2所示, 在温度为 $35^\circ\text{C}$ 、盐度为40‰时和温度为 $0^\circ\text{C}$ 、盐度为20‰时分别获得温度传感灵敏度最大值1.8488nm/ $^\circ\text{C}$ 和最小值0.4262nm/ $^\circ\text{C}$ , 中间值为1.1375nm/ $^\circ\text{C}$ ; 在温度为 $0^\circ\text{C}$ 、盐度为40‰时和温度为 $35^\circ\text{C}$ 、盐度为20‰时分别获得盐度传感灵敏度最大值-2.3098nm/‰和最小值-1.9805nm/‰, 中间值为-2.1452nm/‰。



(a) 温度传感灵敏度



(b) 盐度传感灵敏度

图2 基于MZI的传感器单元在1550nm波长处的传感灵敏度

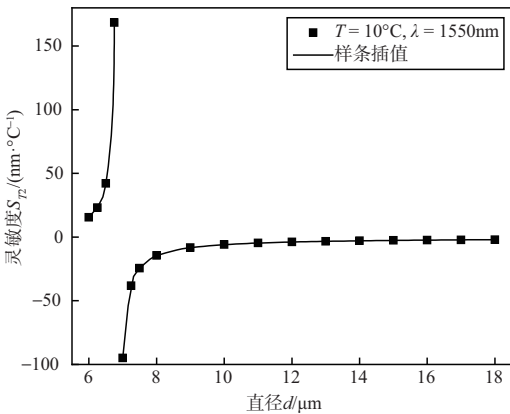
通道2接入的是一个基于MMI的传感器单元，MMI周围被聚二甲基硅氧烷（Polydimethylsiloxane, PDMS）包覆。MMI是由普通单模光纤拉锥形成的过渡区-微光纤-过渡区结构，当宽带光源产生的光经单模光纤传输到过渡区时，一部分光由原来光纤的纤芯模式耦合到微光纤的基模HE<sub>11</sub>，另一部分光则耦合到微纳光纤的高阶模（主要是HE<sub>12</sub>模式），在微光纤中传输时，这两种模式具有不同的有效折射率从而产生相位差，当它们在第二个过渡区耦合至纤芯模式时，积累的相位差产生干涉现象<sup>[22]</sup>。微光纤基模和高阶模的有效折射率与微光纤自身及PDMS折射率均相关且响应不同，当温度变化导致微光纤自身和PDMS折射率变化，模式之间相位差改变，干涉光谱发生漂移，通过标定光谱移动量与温度变化量之间的关系并追踪光谱的移动可获得温度变化。当这一传感器单元浸没在海水中时，由于MMI被PDMS包覆，不与海水直接接触，因此仅通过热传导感知海水温度变化。与式（5）同理，基于MMI的传感器单元的温度传感灵敏度 $S_{T_2}$ 关系式可推导为

$$S_{T_2} = \frac{d\lambda}{dT} = \frac{1}{B/\lambda - \partial B/\partial \lambda} \cdot \left( \frac{\partial B}{\partial T} + \alpha B \right) \quad (7)$$

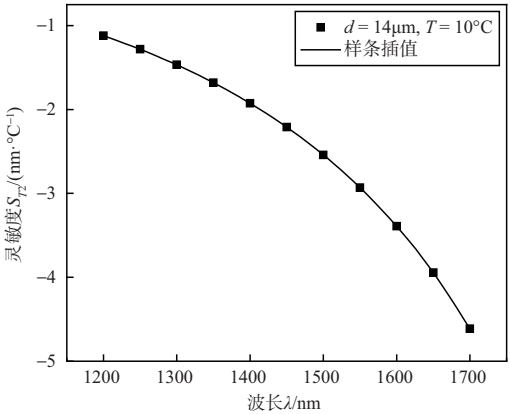
式中， $\lambda$ 是波长， $B$ 是微光纤基模与高阶模有效折射率的差值， $T$ 是温度。基于MMI的传感器单元的传感灵敏度不仅与海水温度、探测波长相关，还与微光纤直径相关，根据式（7）计算温度为10℃、1550nm波长下具有不同微光纤直径的传感器单元的传感灵敏度，如图3（a）所示。由图3（a）可知，随着微光纤直径的减小，传感灵敏度先增大后减小，当微光纤直径为6.85μm时，由于传感灵敏度关系式中的分母项 $B/\lambda - \partial B/\partial \lambda$ 值为0，即达到色散拐点，因此灵敏度达到无穷大。

为了使后续海水温盐度测量准确度不被基于MMI的传感器单元限制，只需优化其参数使得其传感灵敏度大于基于MZI的传感器单元即可。由图3（a）可知，这个条件可以满足。计算温度为10℃、微光纤直径为14μm的MMI传感器单元在不

同波长下的灵敏度，如图3（b）所示。由图3（b）可知，此结构参数的MMI传感器单元温度传感灵敏度随着波长的增大而增大，在1550nm波长处灵敏度为-2.9307nm/℃，略大于基于MZI的传感器单元的最大温度传感灵敏度，因此后续计算中基于MMI的传感器单元的微光纤直径设定为14μm。



(a) 温度为10℃、1550nm波长下的灵敏度与微光纤直径关系曲线



(b) 直径为14μm、温度为10℃下的灵敏度与波长关系曲线

图3 基于MMI的传感器单元的灵敏度曲线

将本文提出的光纤传感器与已报道的其他光纤温盐度传感器灵敏度进行对比，如表1所示，其中LPG为长周期光栅（Long Period Grating）。由表1可以看出，本文提出的光纤传感器具有较高的灵敏度且两个传感器单元灵敏度处于同一量级，从而减小了由于某一传感器单元的低灵敏度对测量准确度的影响。

表1 不同结构的光纤温盐度传感器的灵敏度

| 项目<br>文献 | 传感器结构    | 温度传感灵敏度 $S_{T_1}$ /nm/℃ | 盐度传感灵敏度 $S_{S_1}$ /nm/‰ | 温度传感灵敏度 $S_{T_2}$ /nm/℃ | 盐度传感灵敏度 $S_{S_2}$ /nm/‰ |
|----------|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| [17]     | MZI&FPI  | 1.1854                  | -2.0689                 | -0.1019                 | 0.2018                  |
| [23]     | Dual FBG | 0.0321                  | -0.00358                | 0.0095                  | 0                       |
| [24]     | MZI      | -0.263                  | 0.234                   | -0.251                  | 0.206                   |
| [25]     | LPG&FBG  | 0.063                   | 0.01287                 | 0.05                    | 0                       |
| [26]     | MZI      | 1.3846                  | -2.65                   | 1.2804                  | -2.5948                 |
| 本文       | MZI&MMI  | 1.1375                  | -2.1452                 | -2.9307                 | 0                       |

最后，调整两个传感器单元的长度以匹配它们的波长动态范围。经计算，当基于MZI和MMI的传感器单元在20℃时的长度 $L_1$ 和 $L_2$ 分别为110μm和3mm时，它们的波长动态范围保持一致。

2 仿真结果与讨论

当联合使用两个传感器单元测量温盐度时，需先通过仿真计算传感器单元在不同温盐度下的光谱，提取干涉峰波长并完成标定。基于MMI的传感器单元在不同温度下的归一化光谱如图4（a）所示，温度范围为0~35℃，随着温度升高，光谱逐渐向短波方向移动。为了探究光谱分辨率对测量结果的影响，计算光谱时采用了0.1nm和0.02nm两个分辨率。将温度 $T$ 与其对应干涉峰波长 $\lambda_M$ 绘制在同一坐标系中，如图4（b）所示。对坐标系中的散点进行三次多项式拟合，得到了基于MMI的传感单元的标定关系式

$$\lambda_M = 1557.99234 - 3.76446T + 0.05377T^2 - 4.44329 \times 10^{-4}T^3$$
$$\lambda_M = 1557.97383 - 3.76002T + 0.05367T^2 - 4.44498 \times 10^{-4}T^3$$

(8)

(9)

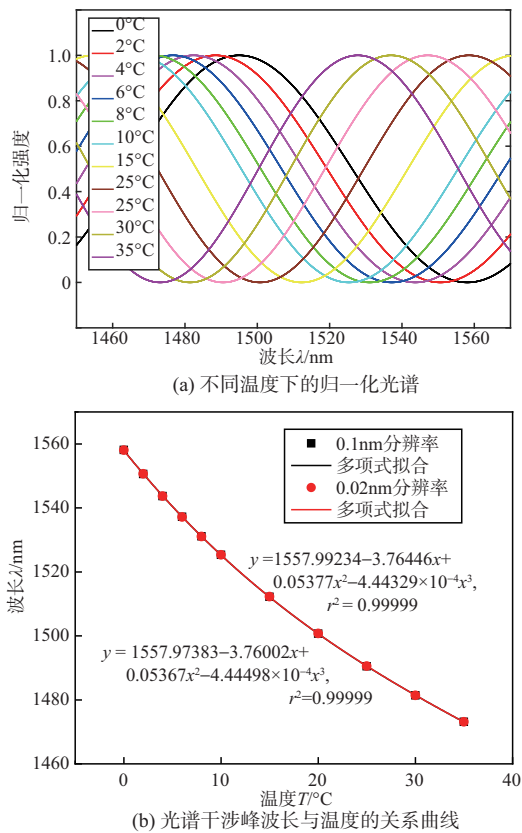


图4 基于MMI的传感器单元的光谱与标定曲线

式（8）和式（9）分别对应0.1nm和0.02nm两个光谱分辨率下的结果，拟合优度均达到0.99999。从图中和标定关系式中均可以看出，两个分辨率下的标定曲线非常接近，但不完全重合，

这表明由于光谱分辨率有限，不能完全获得大多数干涉峰的准确位置，因此标定关系式也存在细微差异。

同理，计算基于MZI的传感器单元在不同温盐度下的归一化光谱并提取干涉峰波长 $\lambda_z$ 与其对应的温盐度 $T$ 、 $S$ 绘制于同一坐标系中，温度范围为0~35℃，盐度范围为20~40‰，如图5所示，干涉峰波长随温度升高向长波方向移动，随盐度升高向短波方向移动。对坐标系中的散点进行多项式曲面拟合，得到了基于MZI的传感单元的标定关系式

$$\lambda_z = 1564.31471 - 2.18764S + 0.3564T + 0.01816T^2 + 0.00644ST$$
$$\lambda_z = 1564.34196 - 2.18818S + 0.35429T + 0.01823T^2 + 0.00644ST$$

(10)

(11)

式（10）和式（11）分别对应0.1nm和0.02nm两个光谱分辨率下的结果，拟合优度均达到0.99995。从标定关系式中可以看出，两个分辨率下的标定曲面非常接近，但不完全重合，这同样表明由于光谱分辨率有限导致标定关系式存在细微差异。

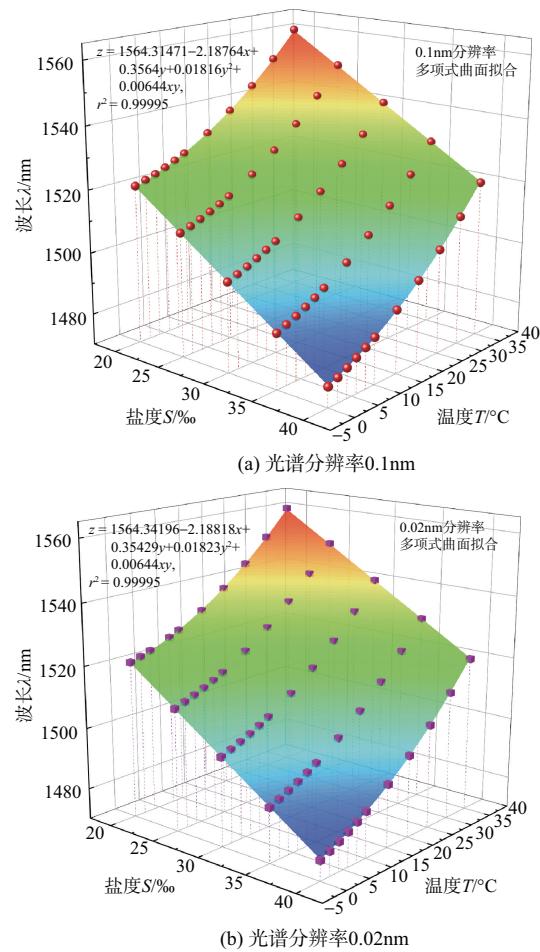


图5 MZI光谱干涉峰波长与温盐度的关系曲面

式（8）、（10）和式（9）、（11）分别描述了不同光谱分辨率下干涉峰位置与温盐度的关系，当测量温盐度时，一旦获取了两个传感单元光谱

特征峰的位置，根据所用测量分辨率将光谱特征峰位置代入式 (8)、(10) 或式 (9)、(11) 中可以实现温盐度解调。为了验证式 (8)、(10) 和式 (9)、(11) 解调的准确性且便于与已报道的结果<sup>[17]</sup> 进行比较，以温度分别为 1℃、3℃、5℃、9℃、16℃、24℃、33℃，盐度分别为 22‰、27‰、32‰、37‰ 为真值分别计算 0.1nm 和 0.02nm 两个光谱分辨率下传感器单元干涉峰位置，再分别代入式 (8)、(10) 和式 (9)、(11) 进行解调，得到的仿真测量值与真值绘制于同一坐标系中，如图 6 所示。作为对比，将已报道的双光纤干涉仪仿真测量海水温盐度结果也绘制在图 6 中，双光纤干涉仪中采用 MZI 作为传感器单元之一，其结构和灵敏度与本文提出的双通道光纤传感器中采用的基于 MZI 的传感器单元基本一致；另一传感单元为 FPI，其灵敏度比基于 MMI 的传感器单元低一个数量级<sup>[17]</sup>。从图 6 可以看出，双光纤干涉仪的仿真测量值与真值出现明显偏差，而双通道光纤传感器在 0.1nm 和 0.02nm 两个光谱分辨率下仿真测量值均与真值几乎重合，其偏差更小。

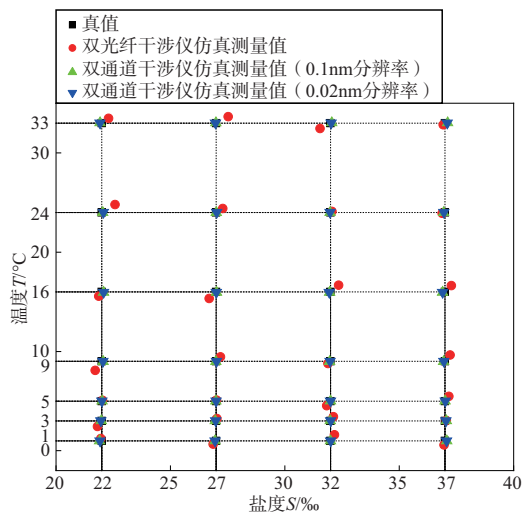


图 6 双光纤干涉仪和双通道光纤传感器在 0.1nm 和 0.02nm 两个光谱分辨率下的温盐度仿真测量结果对比图

为了精确比较不同结构的光纤温盐度传感器的测量准确度，将所有温盐度测量值与其对应真值之差的绝对值的平均值定义为平均偏差<sup>[17,26]</sup>。平均偏差越小说明测量准确度越高。不同结构的光纤温盐度传感器的平均测量偏差如表 2 所示，从中可以看出，本文所提出的方法通过使两个传感器单元具有高灵敏度以减小干涉峰位置读取偏差的影响，从而使得测量海水温盐度的准确度具有显著提升。通过比较双通道光纤传感器在不同光谱分辨率下的仿真测量偏差可以进一步发现，更小的光谱分辨率使得测量偏差更小，原因是更小的

光谱分辨率使得干涉峰位置读取更加精确，与理论值的偏差减小，因此采用更小分辨率的探测设备可以进一步提升测量准确度。

表 2 不同结构的光纤温盐度传感器的平均测量偏差

| 项目文献 | 传感器结构                                 | 平均温度偏差/℃ | 平均盐度偏差/‰ |
|------|---------------------------------------|----------|----------|
| [17] | MZI&FPI                               | 0.4191   | 0.1944   |
| [26] | MZI                                   | 0.1599   | 0.0779   |
| 本文   | MZI&MMI (0.1—nm spectral resolution)  | 0.021    | 0.0426   |
| 本文   | MZI&MMI (0.02—nm spectral resolution) | 0.0151   | 0.039    |

3 结 论

本文提出了一种双通道传感器用于海水温盐度测量，包含基于 MZI 和 MMI 结构的两个传感器单元。基于 MZI 的传感器单元能感知温盐度变化，而基于 MMI 的传感器单元仅能感知温度变化，利用干涉峰波长与温盐度的关系曲面与曲线作为标定方程，实现了温盐度的解调。

通过分析两个传感器单元的传感灵敏度表达式发现，基于 MZI 的传感器单元的灵敏度与自身结构参数无关，而基于 MMI 的传感器单元的灵敏度与自身微光纤直径息息相关。通过优化微光纤直径，使得两个传感器单元具有较高灵敏度且处于同一数量级，基于 MZI 的传感器单元的温盐度传感灵敏度最大值分别达 1.8488nm/℃ 和 -2.3098nm/‰，基于 MMI 的传感器单元的温度传感灵敏度最大值为 -2.9307nm/℃。在此基础上，对温盐度测量进行了仿真计算，结果表明，在 0.1nm 和 0.02nm 两个光谱分辨率下，温度测量平均偏差分别为 0.021℃ 和 0.0151℃，盐度平均偏差分别为 0.0426‰ 和 0.039‰，显著低于已报道的传感器测量结果。

本文所提出的双通道光纤传感器具有较高的测量准确度，为海水温盐度测量提供了新思路。此外，这种同时使用高灵敏度传感器单元以减小干涉峰位置读取偏差的影响，从而提高测量准确度的策略被证明是有效的，通过进一步提升传感器单元的灵敏度，有望使测量准确度进一步提高。

参考文献：

[1] Wang Z, Yin X, Li X, et al. Water mass variations in the maluku channel of the indonesian seas during the winter of 2018 – 2019[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2023, 128 (3):e2022JC018731.

[2] Zhu Q M, Cen R X, Zhou Q S, et al. Effects of internal waves on bottom thermal structures and turbulent mixing in the Xisha Islands[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2024, 209:104327.

- [3] Torres S H, Wineteer A, Rodriguez E, et al. Submesoscale eddy contribution to ocean vertical heat flux diagnosed from airborne observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(2):e2024GL112278.
- [4] 李志锦, 费建芳, 张人禾, 等. 西太平洋区域海洋中尺度数值预报及卫星高度计资料同化方法[J]. *中国科学:地球科学*, 2025, 55(3):936—954.
- Li Zhijin, Fei Jianfang, Zhang Renhe, et al. Numerical prediction of oceanic mesoscale circulation and satellite Numerical prediction of oceanic mesoscale circulation and satellite[J]. *Science China Earth Sciences*, 2025, 68(3):909—927.
- [5] 周灵钧, 于洋, 孟洲. 光纤海洋温盐深传感器研究进[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13):1306019.
- Zhou Lingjun, Yu Yang, Meng Zhou. Review of fiber optic ocean conductivity-temperature-depth sensor[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13):1306019.
- [6] Wang J, Zhou X, Miao Y, et al. Integrated and compact fiber-optic conductivity-temperature-depth (CTD) sensor for marine detection[J]. *Optics and Laser Technology*, 2023, 164:109523.
- [7] Zhang S Q, Zhao Y, Peng Y, et al. High-sensitivity optical fiber SPR sensor with cascaded biconical fiber and hetero-core structure for simultaneous measurement of seawater salinity and temperature[J]. *Optics and Laser Technology*, 2024, 170:110275.
- [8] Pan Z, Liu H, Wang L, et al. Draw-tower-grating-based Fabry-Perot interferometers for simultaneous measurements of temperature and salinity[J]. *Optics Express*, 2024, 32(13):22687—22699.
- [9] Garcia Izquierdo C, Garcia-Benadi A, Corredera P, et al. Traceable sea water temperature measurements performed by optical fibers[J]. *Measurement*, 2018, 127:124—133.
- [10] Wang X, Yang H, Wang S, et al. Seawater temperature measurement based on a high-birefringence elliptic fiber Sagnac loop[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16):1772—1775.
- [11] Guo J, Sun M, Fang J, et al. High-sensitivity seawater salinity sensing with cladding etched fiber bragg grating technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(13):14182—14192.
- [12] Zhang S, Peng Y, Wei X, et al. High-sensitivity biconical optical fiber SPR salinity sensor with a compact size by fiber grinding technique[J]. *Measurement*, 2022, 204:112156.
- [13] Lv R, Qu J, Zhang M, et al. A simple combination method of mzi and mi for salinity measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71:9511507.
- [14] Liu Y, Jing Z, Liu Q, et al. All-silica fiber-optic temperature-depth-salinity sensor based on cascaded EFPIs and FBG for deep sea exploration[J]. *Optics Express*, 2021, 29(15):23953—23966.
- [15] Zhao Y, Zhao J, Wang X X, et al. Femtosecond laser-inscribed fiber-optic sensor for seawater salinity and temperature measurements[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 353:131134.
- [16] Zheng H K, Zhao Y, Lv R Q, et al. Reflective optical fiber sensor based on dual fabry perot cavities for simultaneous measurement of salinity and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(24):27495—27502.
- [17] Liao Y, Yang K, Shi X. Theoretical study on simultaneous measurement of seawater temperature and salinity based on dual fiber interferometers combined with nonlinear decoupling algorithm[J]. *Measurement*, 2023, 211:112596.
- [18] Tong R J, Zhao Y, Zheng H K, et al. Simultaneous measurement of temperature and relative humidity by compact Mach-Zehnder interferometer and Fabry-Perot interferometer[J]. *Measurement*, 2020, 155:107499.
- [19] Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(10):1205—1209.
- [20] Quan X, Fry E S. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(18):3477—3480.
- [21] Liao Y P, Wang H C, Wang S S, et al. Dual-path Mach-Zehnder interferometers with unequal geometrical path length for ultrasensitive refractive index sensing[J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2021, 39(8):2565—2572.
- [22] Liao Y, Wang J, Yang L, et al. In-situ detection for ocean internal solitary waves based on a miniaturized microfiber-optic salinity sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(24):14836—14842.
- [23] Sun M, Jiang H, Shi B, et al. Development of FBG salinity sensor coated with lamellar polyimide and experimental study on salinity measurement of gravel aquifer[J]. *Measurement*, 2019, 140:526—537.
- [24] Yu L, Wang J, Yin B, et al. Ocean exploration-oriented temperature and salinity sensor based on bend-insensitive microfiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Express*, 2024, 32(16):28130—28147.
- [25] 梁芳, 廖建军, 荀燕琴, 等. 基于光纤感知的盐深传感系统设计[J]. *激光与红外*, 2024, 54(11):1799—1804.
- Liang Fang, Liao Jianjun, Xun Yanqin, et al. Design of salt depth sensing system based on fiber optic sensing[J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(11):1799—1804.
- [26] 吴新新, 常建华, 胡子怡, 等. 基于多项式曲面解耦算法的光纤温盐度传感器[J]. *光学学报*, 2024, 44(23):2306002.
- Wu Xinxin, Chang Jianhua, Hu Ziyi, et al. Optical fiber temperature and salinity sensor based on polynomial surface decoupling algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(23):2306002.