

实时双环谐振腔光谱包络拟合

赵凯浩 李明宇 王朝宇 陈鑫 关博仁 何建军 林初月 董文飞

Envelope fitting for real-time cascaded microring resonator's output spectrum

ZHAO Kai-hao, LI Ming-yu, WANG Zhao-yu, CHEN Xin, GUAN Bo-ren, HE Jian-Jun, LIN Chu-yue, DONG Wen-fei

引用本文:

赵凯浩, 李明宇, 王朝宇, 陈鑫, 关博仁, 何建军, 林初月, 董文飞. 实时双环谐振腔光谱包络拟合[J]. *中国光学*, 2024, 17(4): 780-788. doi: 10.37188/CO.2023-0195

ZHAO Kai-hao, LI Ming-yu, WANG Zhao-yu, CHEN Xin, GUAN Bo-ren, HE Jian-Jun, LIN Chu-yue, DONG Wen-fei. Envelope fitting for real-time cascaded microring resonator's output spectrum[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 780-788. doi: 10.37188/CO.2023-0195

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0195>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高精度硅基集成光学温度传感器研究

High-precision silicon-based integrated optical temperature sensor

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1355 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0054>

纳流通道-谐振腔耦合结构测量荧光物质微位移

Nanofluidic channel-resonant cavity structure for measuring micro-displacement of fluorescent substances

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 145 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0076>

耦合区数量对鼎形微环谐振器输出的影响

The influence of the number of coupling regions on the output of the ding-shaped microring resonator

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1493 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0009>

基于Au纳米平行双棒超表面阵列的双Fano共振和折射率传感器特性研究

Double Fano resonance and refractive index sensors based on parallel-arranged Au nanorod dimer metasurface arrays

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 961 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0008>

奇偶探测超分辨率折射率测量的理论研究

Theoretical investigation on super-resolution refractive index measurement with parity detection

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 434 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0119>

氨气高精度激光光谱检测装置的设计及实现

Design and achievement of a device for high-precision ammonia gas detection based on laser spectroscopy

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1129 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0023>

文章编号 2097-1842(2024)04-0780-09

实时双环谐振腔光谱包络拟合

赵凯浩¹, 李明宇^{1*}, 王朝宇¹, 陈鑫¹, 关博仁¹, 何建军², 林初月³, 董文飞⁴

(1. 长春理工大学光电工程学院光学工程系, 吉林长春 130022;

2. 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江杭州 310027;

3. 浙江光尖电子技术有限公司, 浙江温州 325011;

4. 中国科学院苏州生物医学工程研究所, 浙江苏州, 215163)

摘要: 双环级联谐振腔 (Cascaded Microring Resonators, CMRR) 传感器作为一种新型的光学传感器, 具有高灵敏度、易于集成、功耗小等优点被广泛应用于生物、医学等领域。为了实现 CMRR 传感器输出光谱的实时数据分析处理, 提出了一种基于 Python 的实时 CMRR 传感器输出光谱包络拟合方法。首先, 利用不同的拟合模型对 CMRR 传感器输出光谱进行拟合; 然后, 通过灵敏度误差百分比对不同拟合模型的拟合误差进行比较, 结果显示平滑样条拟合法在实时处理 CMRR 传感器输出光谱过程中表现最佳; 最后对不同浓度的 NaCl 溶液进行实时输出光谱采集处理, 验证了 CMRR 传感器输出光谱实时采集处理程序的可靠性。实验结果表明 CMRR 传感器的波长漂移量与溶液浓度呈线性关系。通过计算可知 CMRR 传感器对于盐水的灵敏度约为 671.03529 nm/RIU。

关键词: 集成光学; 双环级联谐振腔; 包络拟合; 折射率; 光学谐振腔

中图分类号: TN256 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0195

Envelope fitting for real-time cascaded microring resonator's output spectrum

ZHAO Kai-hao¹, LI Ming-yu^{1*}, WANG Zhao-yu¹, CHEN Xin¹, GUAN Bo-ren¹,
HE Jian-Jun², LIN Chu-yue³, DONG Wen-fei⁴

(1. Department of Optical Engineering, School of Opto-Electronic Engineering,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Zhejiang Lightip Electronics Technologies Co., Ltd., Wenzhou 325011, China;

4. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese
Academy of Science, Suzhou 215163, China)

* Corresponding author, E-mail: limingyu@cust.edu.cn

Abstract: Cascaded Microring Resonators (CMRR), a new type of optical sensor, are widely used in biology,

收稿日期: 2023-10-31; 修订日期: 2023-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62027825); 吉林省自然科学基金 (No. 20220101130JC); 高等学校学科创新引智计划 (No. D21009)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62027825); Natural Science Foundation of Jilin Province (No. 20220101130JC); the 111 Project of China (No. D21009)

medicine, and other fields because of their high sensitivity, easy integration, and low power consumption. In this paper, we propose a Python-based envelope fitting method for real-time CMRR sensor's output spectrum to achieve real-time data analysis and processing of the CMRR sensor's output spectrum. First, different fitting models were used to fit the output spectrum of the CMRR sensor. Then, the fitting errors of different fitting models were compared by sensitivity error percentage, and it was concluded that the smooth spline fitting method performed best in real-time processing of the output spectrum of the CMRR sensor. Finally, NaCl solution with different concentrations was used for real-time acquisition and processing of the output spectrum. The reliability of the real-time acquisition and processing program for the CMRR sensor's output spectrum is verified. The experimental results show that the wavelength drift of the CMRR sensor is linearly related to the concentration of the solution. It can be seen from the calculation that the sensitivity of the CMRR sensor for brine is about 671.035 29 nm/RIU.

Key words: integrated optics; cascaded microring resonators; envelope fitting; refractive index; optical resonator

1 引言

微环谐振器 (Microring Resonator, MRR) 是一种新的光学传感器, 其因具有灵敏度高, 结构简单易于集成、易于进行表面修饰等优点^[1-5], 而被广泛应用于光学滤波^[6-7]、光开关^[8-9]、生物监测^[10-13]、声光探测^[14-16] 等邻域。通过将 MRR 与微流体通道集成可以使其在生物医学和化学领域拥有更广泛的应用前景^[17-19]。

MRR 检测可分为波长检测与功率检测两种。其中最常用的为波长探测。其通过比对传感器输出端光谱峰值的漂移量来检测待测物质的折射率、浓度等信息。2011 年, 浙江大学的金磊等人在 MRR 传感器结构上增加了一个不受待测溶液影响的参考环, 使其产生游标效应, 极大地增加了传感器的灵敏度, 减小了波长探测对仪器精度的要求。这种形式的微环传感器称为双环级联谐振腔 (Cascaded Microring Resonators, CMRR) 传感器^[20-21]。此种传感器无法直接从输出光谱上获取谐振波长的漂移量, 需要对输出光谱进行包络拟合, 将包络谐振峰的漂移量作为传感信号。目前国内外对 CMRR 传感器输出光谱的处理方式均为获取数据后再通过 MATLAB 进行数据拟合, 无法实现实时检测^[22-25], 极大地限制了 CMRR 传感器在生活中的应用。因此, 研究一种 CMRR 传感器输出光谱的实时高效处理方法是非常必要的。

本文提出了一种基于 Python 的实时检测 CMRR 输出光谱包络拟合方法。该方法整合了传感器检测和数据处理两个步骤, 且操作简便, 极大减少了数据检测对专业能力的要求。对不同浓度 NaCl 溶液的输出光谱采用不同的拟合方法进行对比, 通过分析灵敏度误差百分比等因素, 得出平滑样条拟合法相较于其他拟合模型具有更高的适用性。基于平滑样条拟合法设计了 CMRR 输出光谱包络拟合方法的软件逻辑与界面分布。利用该软件对 CMRR 传感器进行实时数据采集以证明其实用性。对该图像进行进一步的分析得出峰值漂移量与 NaCl 浓度线性相关。求得 CMRR 传感器对盐水的灵敏度约为 671.035 29 nm/RIU。本文的研究结果对于实时处理 CMRR 传感器光谱数据, 拓宽 CMRR 传感器在医疗、环境的实时在线监测等的应用具有重要意义。

2 双环谐振腔理论

2.1 CMRR 传感器原理

MRR 的传感原理为使待测液体与环形谐振腔波导相互作用, 使得谐振腔的谐振条件发生变化, 导致谐振波长发生改变。通过测量谐振波长的变化即可测得待测液体的折射率、浓度等信息。CMRR 可认为是在 MRR 的前提下串联了一个不与被测液体相互作用的微环作为参考微环。图 1 为 CMRR 传感器的显微图, 光从输入端进

入 CMRR 传感器, 经过传感环后通过波导耦合进入参考环, 最终从 CMRR 传感器的输出端出射。

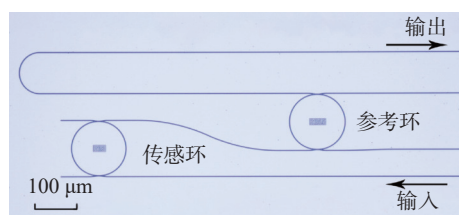


图 1 CMRR 传感器显微图

Fig. 1 Schematic of CMRR sensor's micrograph

由基于波长探测的环形谐振腔原理^[24]可知, 光通过双环级联谐振腔之后的输出光谱满足如下公式:

$$T = 10 \times \log_{10} \left| \frac{k_1 k_2 \exp(-j(\beta - j\alpha_R)\pi R)^2}{1 - t_1 t_2 \exp(-j(\beta - j\alpha_R)2\pi R)^2} \right|, \quad (1)$$

其中, k_1 、 k_2 分别为环形谐振腔与其两侧波导耦合区的交叉耦合系数, t_1 与 t_2 为对应的直通耦合系数, R 表示环形谐振腔半径, α_R 与 β 表示谐振腔的传输损耗与传播常数。两环输出光谱均满足公式 (1)。从输出端出射的光谱 T 满足如下公式:

$$T = T_S \times T_R, \quad (2)$$

其中 T_R 与 T_S 分别表示参考环与传感环的输出光谱, 通过仿真得到输出端的输出光谱如图 2 所示。

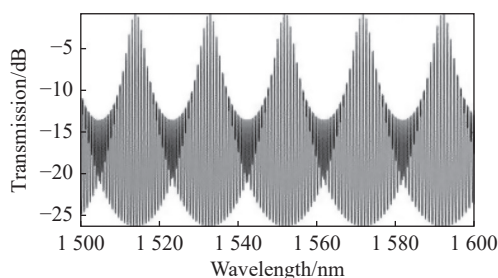


图 2 CMRR 传感器输出端输出光谱

Fig. 2 Output spectrum of CMRR sensor

2.2 CMRR 传感器拟合误差分析原理

传感器的灵敏度是评价传感器性能的重要指标。它直接反映了传感器在不同使用环境下自身有效折射率变化的感知能力。理想情况下, CMRR 传感器灵敏度 S 满足如下公式:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n_c} = F \cdot S_s, \quad (3)$$

式中, $\Delta\lambda$ 为包络主谐振峰波长漂移量, Δn_c 为周围环境的折射率变化量, F 表示游标效应产生的波长漂移的放大系数, S_s 表示传感环灵敏度。放大系数的计算公式为:

$$F = \frac{F_r}{|F_s - F_r|}, \quad (4)$$

其中 F_s 与 F_r 分别表示传感环与参考环对应的自由光谱范围。由式 (2)、式 (3) 可推导得到理想情况下 CMRR 传感器灵敏度与参考环、传感环自由光谱范围之间的关系:

$$S = \frac{F_r \cdot S_s}{|F_s - F_r|}. \quad (5)$$

为了更直观地比较不同拟合方法对 CMRR 传感器输出光谱的拟合效果, 引入灵敏度误差百分比 θ 来评估经过不同拟合模型处理后的灵敏度误差。具体定义如下:

$$\theta = \frac{|S - S_r|}{S} \times 100\%, \quad (6)$$

其中 S_r 表示经过不同拟合模型处理之后 CMRR 传感器的实际灵敏度数值, 灵敏度误差百分比可直接反映不同拟合模型的灵敏度计算误差大小。

3 实验与分析

3.1 实验设计原理与实验装置介绍

图 3 为 CMRR 传感器的输出光谱检测原理图。检测过程通过电脑控制各个实验仪器, 包括可调谐激光器、功率计与微流泵。可调谐激光器、功率计与计算机之间通过通用接口总线 (General-Purpose Interface Bus, GPIB) 进行通讯, 微流泵与计算机之间则采用 USB 连接。实验中, 将可调谐激光器作为光源, 通过偏振控制器调节输入光为 TM (Transverse Magnetic, TM) 模式, 输出波长范围设置为 1540~1560 nm, 步长为 5 pm, 扫谱速度为 1 nm/s。

实验仪器与设备型号如表 1 所示。实验过程中, 利用微流注射泵注入不同被测溶液, 将废液收集在烧杯中。被测溶液通过微流通道进入传感环, 使传感环波导的有效折射率发生改变, 进而使

传感器输出光谱发生漂移。通过监测和分析介质层折射率引起的包络峰值漂移量计算 CMRR 传感器对于相应溶液浓度变化的灵敏度以及不同抗体与传感器芯片结合的饱和时间等参数。

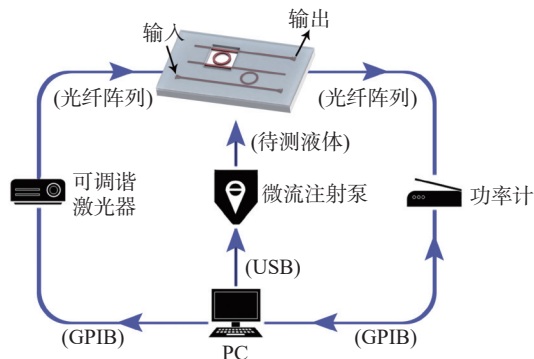


图 3 CMRR 传感器输出光谱检测原理图

Fig. 3 Schematic diagram of spectra detection of CMRR sensor system

表 1 实验仪器与设备型号

Tab. 1 Experimental instruments and equipment models

仪器名称	实验用途	设备型号	生产公司
微流注射泵	定速进样	ZSB-SY03-60-M03-1	南京润泽流体
可调谐激光器	光源	81600B(DE43501059)	Agilent
功率计	探测输出光谱	N7748A	Agilent

3.2 CMRR 传感器实时包络数据采集设计原理

在 CMRR 传感器实时包络数据采集设计流程如图 4 所示。首先,系统进入初始化阶段,其中包括加载并初始化系统界面。此阶段对功率计的采样档位、可调谐激光器的工作范围以及工作步长等参数进行配置。参数配置完成后,系统将立即启动进行实时数据读取。

在实时数据读取过程中,功率计持续采集由 CMRR 传感器输出端输出的光谱数据。这些光谱数据通过计算机进行低通滤波、极大值提取和上包络拟合等操作。随后,通过比较采集到的包络极大值与首次数据组的包络极大值,系统能够精确计算出当前时间点下的 CMRR 传感器输出光谱漂移量。

为了实时监测漂移量的演变趋势,系统通过实时绘制折线图的方式,直观地展示 CMRR 传感器输出光谱漂移量随时间的变化情况。整个流程的目标在于实现对 CMRR 传感器输出光谱的实

时监测与分析,以确保其在不同工作环境下的可靠性和准确性。

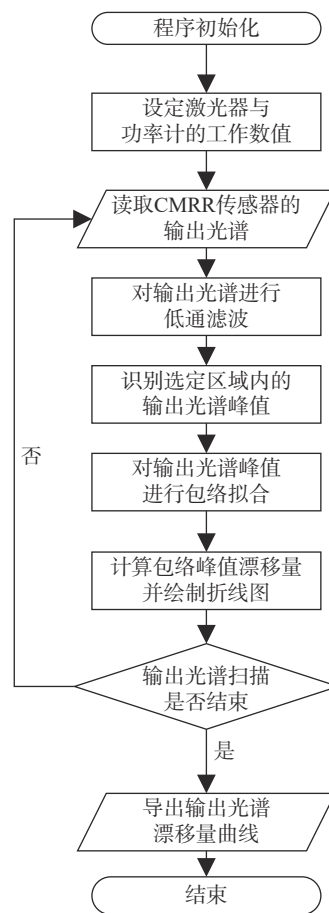


图 4 微环传感器数据采集流程图

Fig. 4 Flowchart of microring sensor data acquisition

3.3 拟合误差分析

根据实际测量得知 122 μm 传感环灵敏度 S_s 为 105 nm/RIU, 122 μm 传感环与 123 μm 参考环的自由光谱范围 F_r 、 F_s 分别为 0.987 nm 与 0.854 nm, 结合式 (4)、式 (5) 求得理想情况下其放大系数为 6.421, CMRR 传感器的灵敏度为 674.205 nm/RIU。

选取 0.4%, 0.8%, 1.2%, 1.6%, 和 2.0% 浓度的 NaCl 溶液对拟合误差进行分析实验。利用该组溶液对 CMRR 传感器进行修饰并采集 CMRR 传感器的输出光谱。将采集到的输出光谱利用平滑拟合^[26-28]、高斯拟合^[29-30]、洛伦兹拟合^[31]、傅立叶拟合^[32-33]4 种不同的拟合方法处理后得到的上包络数据图如图 5(彩图见期刊电子版)所示。

选取上包络峰值数据进行 CMRR 传感器灵敏度分析。结合公式 (6) 可以求得不同包络拟合方法对应的灵敏度误差百分比,见表 2。

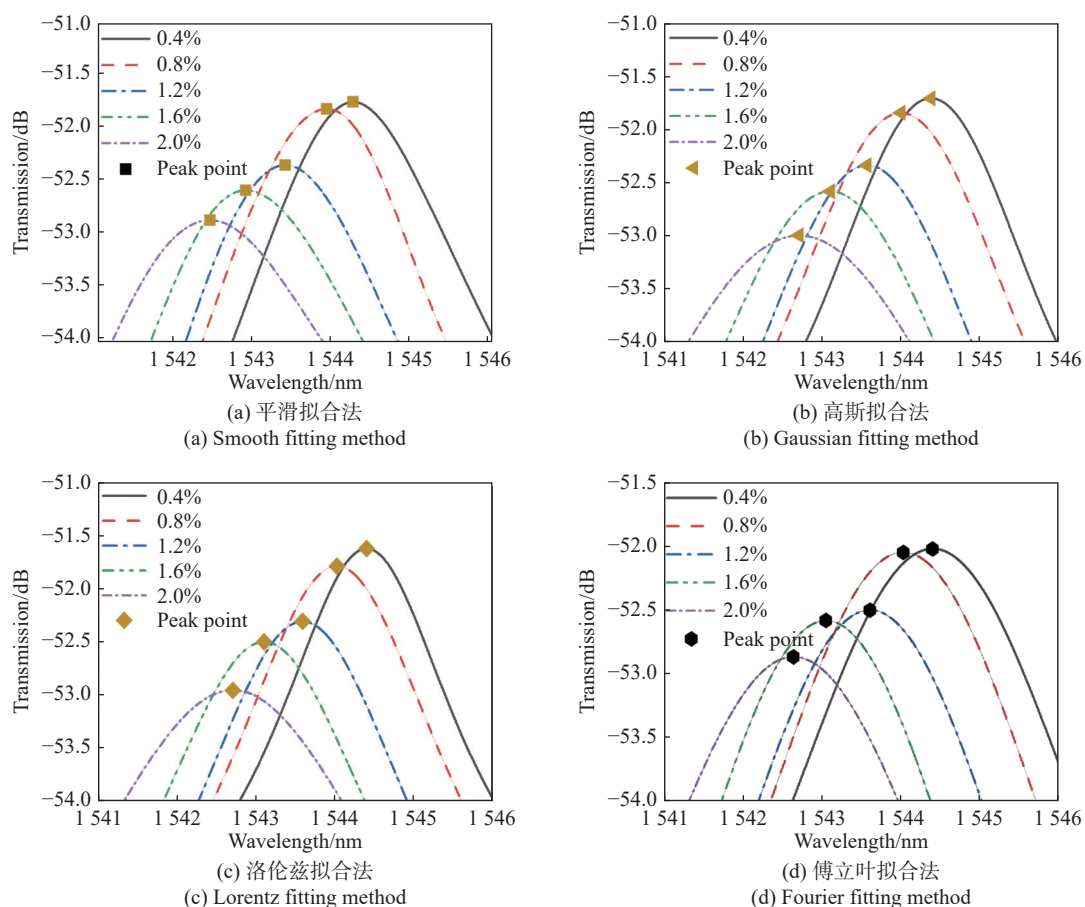


图 5 不同包络拟合法拟合结果比较

Fig. 5 Comparison of fitting results of different envelope fitting methods

由表 2 可知傅立叶拟合法误差百分比最小, 但将傅立叶拟合法应用于实时处理输出光谱时多次出现拟合误差过大、数据无法拟合等问题, 此类问题会导致程序后续处理过程无法正常进行而强制停止, 所以采用平滑拟合进行实时拟合。

表 2 不同拟合法性能对比

Tab.2 Performance comparison of different fitting methods

拟合方法	R-squared	灵敏度 (nm/RIU)	误差百分比 (%)
理想状态		674.205	
平滑拟合法	0.998 132234	685.523	1.67
高斯拟合法	0.994 447952	625.246	7.29
洛伦兹拟合法	0.991 580189	634.419	5.91
傅立叶拟合法	0.969 335 425	663.864	1.53

3.4 CMRR 传感器输出光谱实时采集处理实验

图 6 为 CMRR 传感器输出光谱检测操作界面, 其中 (a) 部分对 CMRR 传感器输出光谱进行扫描所需的可调谐激光器初始化、仪器选择、模

式选择等参数进行设置; (b) 部分将扫描得到的输出光谱显示于 Scanning 区域, 将选定包络区域内的输出光谱经过滤波、拟合等操作后的数据处理结果显示于 Zoom 区中, 并对相对输出光谱漂移量进行计算处理之后绘制于 Wavelength Shift 区域内; (c) 部分包含一个 QTree 模块与 QTextEdit 模块, 前者用于显示扫描得到的输出光谱数据文件, 供科研人员选择, 后者用于显示程序运行报错或者程序运行标志位等信息。

实验开始前, 首先通入水作为背景液, 并实时采集输出光谱数据用于建立参考基线。等待基线趋于稳定后, 引入浓度为 0.4% 的 NaCl 溶液, 随时监测 CMRR 传感器的输出光谱, 确保对每一时刻的漂移量进行准确读取。

当漂移量变化趋于稳定时, 进行退液, 并重新推入背景液进行验证。这一过程旨在验证 CMRR 传感器的可重复性, 并确保实验的准确性。等待背景液再次稳定后, 重新通入下一个浓度值的 NaCl 溶液, 以验证程序基于 CMRR 传感器的实用性。

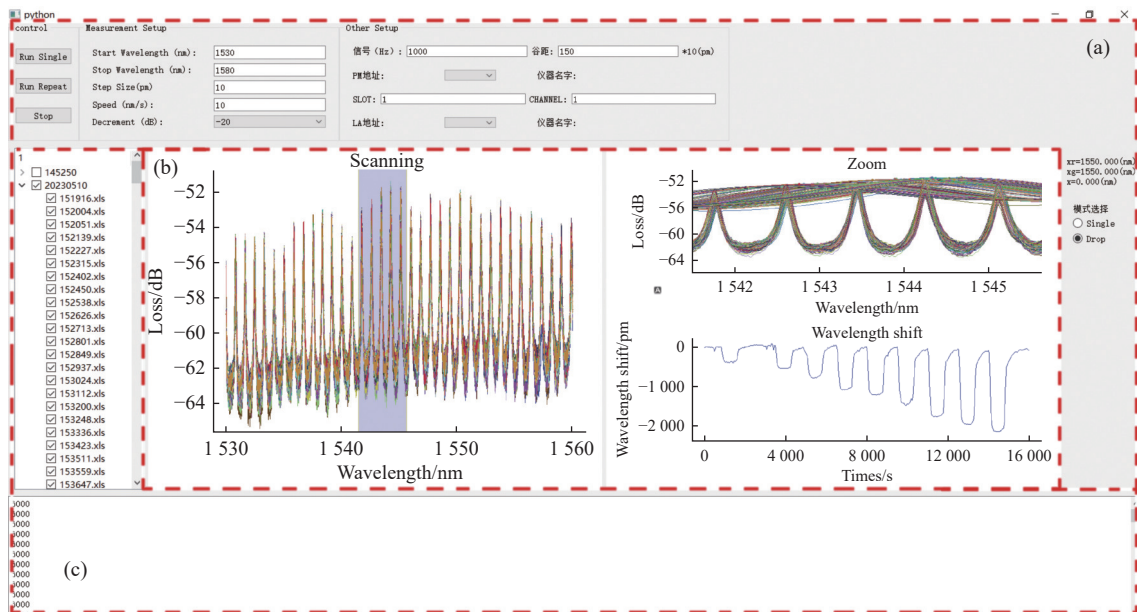


图 6 CMRR 谐振腔传感器输出光谱采集效果

Fig. 6 Transmission spectrum acquisition of CMRR resonator sensor

选取 CMRR 传感器输出光谱中心处包络对输出光谱漂移进行检测, 设定仪器扫谱速度为 10 nm/s, 检测范围为 1541~1546 nm。根据程序运行时间绘制峰值点漂移量, 显示于右下角绘图区域内。该图从左到右 NaCl 检测液浓度分别为 0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%、1.4%、1.6%、1.8%、2.0%。实验用传感环与参考环半径分别为 122 μm 与 123 μm。根据双环谐振腔的灵敏度理论^[25]可知, 当短腔谐振腔用于传感时, 其谐振波长会向长波方向漂移, 所以双环输出谱线向左漂移, 谱线漂移量随着通入 NaCl 溶液的浓度的增大而增大。

图 7 为输出光谱漂移量曲线图。对该组数据进行求导并取导数趋近于 0 的位置作为通入对应溶液浓度之后达到饱和的时间, 对其进行拟合处理得到有效漂移量与浓度直线图, 见图 8。其中, 圆点表示对应浓度选取的有效波长漂移量, 直线为漂移量有关浓度的拟合线, 拟合优度为 0.99635, 斜率与截距分别为 -1.14076 与 0.4824。

根据图 8 中有效漂移量与浓度的拟合关系可知, 该数值随外界溶液浓度呈线性变化。当溶液浓度为 1.0% 时输出光谱漂移量为 1.14076 nm, 其折射率系数为 1.7×10^{-3} RIU/%^[20], 由公式 (2) 可求得 CMRR 传感器对于 NaCl 溶液的灵敏度约为 671.03529 nm/RIU。

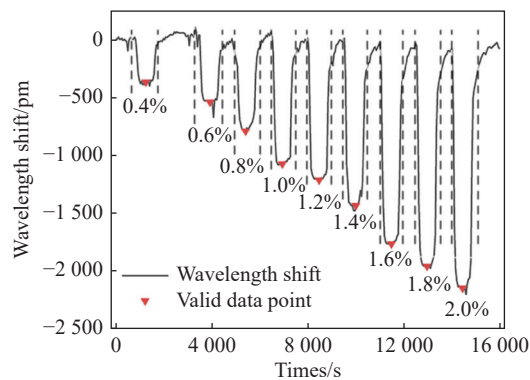


图 7 输出光谱漂移量及有效点值

Fig. 7 Output spectrum drift and effective point values

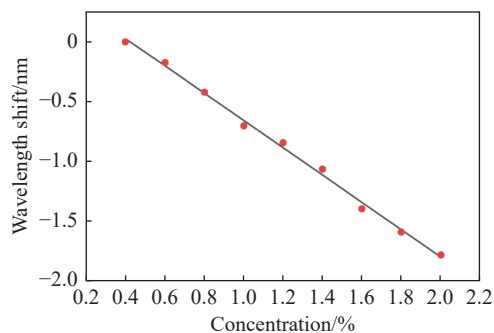


图 8 有效漂移量与浓度拟合关系

Fig. 8 Fitting relationship between effective drift and concentration

4 结 论

本文提出了一种基于 Python 的 CMRR 传感

器输出光谱实时采集处理方法,通过对不同拟合模型进行灵敏度误差评定得知平滑样条拟合合法的灵敏度误差比为 1.67%,且在处理数据方面适用性更好。在 CMRR 传感器实时输出光谱采集检测实验中,通过分析包络峰值漂移量可知 CMRR 传感器对于盐水的灵敏度约为 671.03529 nm/RIU。

相较于传统的 CMRR 传感器输出光谱检测与处理方式,该方法实现了 CMRR 传感器输出光谱的实时检测与数据处理,输出光谱扫描速度约为

10 nm/s,极大地减小了 CMRR 传感器用于溶液检测时的操作难度,拓宽了 CMRR 传感的应用范围。

在测试过程中,注意到由于机械加工误差或探测器达到探测极限等原因,部分传感芯片在制作、刻蚀等环节可能出现损耗过大的问题。这导致光谱谱线在小于 1520 nm 位置出现失真,影响了传感器的性能和准确性。在后续工作中,可通过优化芯片制备工艺和增大探测器探测极限等方法来进一步优化传感芯片的性能。

参考文献:

- [1] BOGAERTS W, DE HEYN P, VAN VAERENBERGH T, *et al.*. Silicon microring resonators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 47-73.
- [2] 谢佳一, 苏国帅, 李明宇, 等. 反射型法布里-珀罗腔和微环谐振腔级联的温度传感器[J]. *光学学报*, 2022, 42(23): 2328002.
XIE J Y, SU G SH, LI M Y, *et al.*. Temperature sensor cascading reflective Fabry-Perot cavity with microring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(23): 2328002. (in Chinese).
- [3] 刘春娟, 王嘉伟, 吴小所, 等. 一种光栅辅助狭缝微环谐振器的传感特性[J]. *光学学报*, 2022, 42(16): 1613001.
LIU CH J, WANG J W, WU X S, *et al.*. Sensing characteristics of grating-assisted slot microring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(16): 1613001. (in Chinese).
- [4] ZHUANG SH Q, FENG J J, LIU H P, *et al.*. Optical multistability in a cross-coupled double-ring resonator system[J]. *Optics Communications*, 2022, 507: 127637.
- [5] 吴蓉, 张皓辰. 耦合区数量对鼎形微环谐振器输出的影响[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(6): 1493-1500.
WU R, ZHANG H CH. The influence of the number of coupling regions on the output of the ding-shaped microring resonator[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1493-1500. (in Chinese).
- [6] 赵荣宇, 崔建功, 余亚鑫, 等. 面向倏逝波传感的光纤谐振腔设计与封装研究[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(6): 21-24.
ZHAO R Y, CUI J G, YU Y X, *et al.*. Design and packaging of optical fiber resonators for evanescent wave sensing[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(6): 21-24. (in Chinese).
- [7] 晏崇宇, 高劭宏, 宋东雨, 等. 单环和双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器的特性分析[J]. *光子学报*, 2015, 44(7): 0713003.
YAN CH Y, GAO SH H, SONG D Y, *et al.*. Characteristic analysis of single and double Micro ring resonant cavity used in Mach-Zehnder interferometer filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(7): 0713003. (in Chinese).
- [8] 朱庆明. 基于波长控制的谐振型硅基光开关及光滤波器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
ZHU Q M. *Research on resonant silicon photonic switch and filter based on wavelength locking*[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese).
- [9] 肖泽华, 李明宇, 苏国帅, 等. 基于扫描反射镜结构的多路光开关[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(1): 136-143.
XIAO Z H, LI M Y, SU G SH, *et al.*. Multi-channel optical switching based on scanning mirror instrumentation[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 136-143. (in Chinese).
- [10] DE VOS K, BARTOLOZZI I, SCHACHT E, *et al.*. Silicon-on-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing[J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7610-7615.
- [11] LIU W L, LI M, GUZZON R S, *et al.*. An integrated parity-time symmetric wavelength-tunable single-mode microring laser[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15389.
- [12] 史冰耀. 面向免标记型光学生物传感的微环谐振器的研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2023.
SHI B Y. *Research on Microring resonators for Label Free optical biosensing*[D]. Beijing: Minzu University of China, 2023. (in Chinese)
- [13] AMBIKA S, VANJERKHEDE K. Modeling and analysis of photonic sensor based on ring resonator for glucose

- detection[J]. *Journal of Optics*, 2023, 52(4): 1837-1844.
- [14] 韩源. 基于光波导环形谐振腔凹槽结构的声传感特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
HAN Y. *Acoustic sensing characteristics research based on the groove structure of optical waveguide resonator*[D]. Taiyuan: North University of China, 2023. (in Chinese).
- [15] PAN J SH, LI Q, FENG Y M, *et al.*. Parallel interrogation of the chalcogenide-based micro-ring sensor array for photoacoustic tomography[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 3250.
- [16] 祝敏, 张文栋, 崔建功, 等. 面向声压传感的硅基槽式谐振腔设计及研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2023(1): 1-6.
ZHU M, ZHANG W D, CUI J G, *et al.*. Design and research of silicon-based resonator for sound pressure sensing[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2023(1): 1-6. (in Chinese).
- [17] CHEN Y Q, YU F, YANG CH, *et al.*. Label-free biosensing using cascaded double-microring resonators integrated with microfluidic channels[J]. *Optics Communications*, 2015, 344: 129-133.
- [18] CARDENOSA-RUBIO M C, ROBISON H M, BAILEY R C. Recent advances in environmental and clinical analysis using microring resonator-based sensors[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2019, 10: 38-46.
- [19] PIRZADA M, ALTINTAS Z. Recent progress in optical sensors for biomedical diagnostics[J]. *Micromachines*, 2020, 11(4): 356.
- [20] JIN L, LI M Y, HE J J. Optical waveguide double-ring sensor using intensity interrogation with a low-cost broadband source[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1128-1130.
- [21] JIN L, LI M Y, HE J J. Analysis of wavelength and intensity interrogation methods in cascaded double-ring sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(12): 1994-2002.
- [22] CLAES T, BOGAERTS W, BIENSTMAN P. Experimental characterization of a silicon photonic biosensor consisting of two cascaded ring resonators based on the Vernier-effect and introduction of a curve fitting method for an improved detection limit[J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 22747-22761.
- [23] 苏畅, 朱慧慧, 曹紫葳, 等. 双环级联谐振腔传感器透射谱线包络拟合方法[J]. *光子学报*, 2018, 47(10): 1023002.
SU CH, ZHU H H, CAO Z W, *et al.*. Fitting methods of transmission spectrum envelope in cascaded double-ring resonator sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(10): 1023002. (in Chinese).
- [24] POON J K S, SCHEUER J, MOOKHERJEA S, *et al.*. Matrix analysis of microring coupled-resonator optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2004, 12(1): 90-103.
- [25] 刘勇. 基于 SOI 的环形谐振腔生物传感器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
LIU Y. *Biosensor based on SOI microring resonators*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese).
- [26] 赵琪涵, 王永红, 高新亚, 等. 基于平滑样条拟合的相位图像滤波评价方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815020.
ZHAO Q H, WANG Y H, GAO X Y, *et al.*. Filtering evaluation method of phase images based on smooth spline fitting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815020. (in Chinese).
- [27] 姚泽楷, 蔡耀仪, 李诗文, 等. 基于平滑样条曲线结合离散状态转移算法的拉曼光谱基线校正方法[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 1811001.
YAO Z K, CAI Y Y, LI SH W, *et al.*. Baseline correction for Raman spectroscopy using cubic spline smoothing combined with discrete state transformation algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1811001. (in Chinese).
- [28] 李立. 基于贝叶斯框架的光滑样条模型研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2023.
LI L. *Advances on smoothing spline model based on Bayesian framework*[D]. Shanghai: East China Normal University, 2023. (in Chinese).
- [29] 高楠, 于永波, 杜振辉, 等. 基于高斯/洛伦兹线型拟合比的谐波检测压强反演研究[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(8): 20230428.
GAO N, YU Y B, DU ZH H, *et al.*. Research on harmonic detection pressure inversion based on Gauss/Lorentz line fitting ratio[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(8): 20230428. (in Chinese).
- [30] 张景源, 陈北北, 杨永兴, 等. 融合遗传算法和 BP 神经网络的光斑定位方法[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(2): 407-414.
ZHANG J Y, CHEN B B, YANG Y X, *et al.*. Positioning algorithm for laser spot center based on BP neural network and genetic algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 407-414. (in Chinese).
- [31] 谭诗斌. Beta 模型的柔性扩展与洛伦兹曲线拟合优化[J]. *数学的实践与认识*, 2023, 53(7): 154-168.

- TAN SH B. Flexible expansion of beta model and Lorentz curve fitting optimization[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2023, 53(7): 154-168. (in Chinese).
- [32] 张凯, 门昌骞, 王文剑. 基于随机傅里叶特征空间的高斯核近似模型选择算法[J]. *数据采集与处理*, 2023, 38(3): 616-628.
- ZHANG K, MENG CH Q, WANG W J. Gaussian kernel approximation model selection algorithm based on random fourier feature space[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2023, 38(3): 616-628. (in Chinese).
- [33] 屈文星, 刘浩, 秦楚, 等. 基于 MATLAB 傅里叶曲线拟合的天线跟踪精度评估方法[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(12): 91-95.
- QU W X, LIU H, QIN CH, *et al.*. Antenna tracking accuracy evaluation method based on MATLAB Fourier curve fitting[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(12): 91-95. (in Chinese).

作者简介:



李明宇(1978—), 男, 吉林长春人, 博士, 教授, 2006年于浙江大学光电信息工程学院获得博士学位, 2006年至2017年浙江大学光电科学与工程学院副教授, 2018年至今长春理工大学光电工程学院教授, 目前主要从事集成光学方面的研究。E-mail: limingyu@cust.edu.cn