

doi:10.3788/gzxb20184710.1023002

双环级联谐振腔传感器透射谱线包络拟合方法

苏畅¹, 朱慧慧¹, 曹紫葳¹, 何建军¹, 李明宇^{1,2}

(1 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2 长春理工大学 光电工程学院光学工程系, 长春 130022)

摘 要:研究了双环级联谐振腔传感器透射谱线包络的拟合方法,用不同拟合函数拟合双环透射谱包络,并利用单环和游标效应分析其拟合误差.理论计算表明,将探测极限提高 10 倍时,对包络作高斯拟合得到的传感器探测误差仅为 0.41%.实验结果表明用波长探测方式,未拟合时传感器探测误差高达 14.96%,而通过对包络作高斯拟合得到的传感器探测误差只有 0.45%.仿真和实验结果均验证了高斯函数的拟合效果最好,可在游标效应增大灵敏度的基础上,进一步提高传感器的探测极限和探测精度.

关键词:集成光学;光波导;曲线拟合;折射率;光学谐振腔

中图分类号:TN252; TN256

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)10-1023002-8

Fitting Methods of Transmission Spectrum Envelope in Cascaded Double-ring Resonator Sensors

SU Chang¹, ZHU Hui-hui¹, CAO Zi-wei¹, HE Jian-jun¹, LI Ming-yu^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 Department of Optical Engineering, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The methods of fitting the envelope of the transmission in a cascaded double-ring resonator sensor were studied. Different fitting functions was used to fit the double-ring transmission spectrum envelope and the fitting error by the single ring and vernier effect was analyzed. The theoretic calculation shows that the detection error of the sensor obtained by Gaussian fitting of the envelope is only 0.41% when the detection limit is increased by 10 times. The experimental results show that for the wavelength detection method, the detection error is as high as 14.96% without fitted. However, the sensor detection error is only 0.45% with Gaussian fitting function. The simulation and experimental results prove that the Gaussian function is the best fitting method, which can further improve the detection limit and the detection accuracy of the sensor based on vernier effect.

Key words: Integrated optics; Optical waveguides; Curve fitting; Refractive index; Optical resonators

OCIS Codes: 230.5750; 230.7370; 130.3120; 130.6010

0 引言

微环谐振腔因其结构简单、功能设计多样化和集成度高等优势^[1],在光学滤波器、微环激光器、光开关和微环传感器中得到了广泛应用^[2-6].基于集成光波导微环谐振腔的光学传感器与微流体技术相结合,具有尺寸小、集成度高、被测物质需求量低以及多通道多参量测量等优点^[7],在环境监测、食品安全和医疗诊断等领域有应用前景^[8-10].

基于单个环形谐振腔的传感器,在波长探测方式下需要高分辨率的光谱仪或者窄线宽的可调激光器,这

基金项目:国家自然科学基金(No.61535010),浙江省自然科学基金(No.LY16F050001)和国家高技术研究发展计划(No.2014AA06A504)资助

第一作者:苏畅(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为基于微环谐振腔的光学生物传感器. Email:suchang@ioe-zju.org

导师(通讯作者):李明宇(1978—),男,教授,博士,主要研究方向为集成光学. Email:limingyu@cust.edu.cn

收稿日期:2018-05-23; **录用日期:**2018-07-06

<http://www.photon.ac.cn>

些仪器不但价格昂贵,而且体积庞大,不利于传感器的小型化.在单环传感器的基础上,引入一个参考环,形成游标效应的双环级联谐振腔结构,大大提高了其灵敏度^[11-13].双环级联谐振腔传感器的工作方式主要分为功率探测和波长探测两种^[14-16].功率探测采用低成本的宽带光源与光功率计结合,不需要透射谱的波长信息,通过探测传感器输出光功率的变化检测样品折射率变化.波长探测需要测量传感器输出透射谱主谐振峰波长位置的移动,检测样品折射率变化.由于游标效应,传感环透射谱谐振峰的移动会被放大,降低了对光谱仪分辨率的需求.功率探测虽然成本相对较低,但探测极限受到功率计灵敏度的限制,灵敏度比波长探测低一个数量级.

当被测样品折射率变化引起的传感环透射谱谐振峰移动量小于参考环和传感环的自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)差时,输出的总透射谱主谐振峰波长位置没有明显移动.但主谐振峰和各次波峰的功率比发生了变化,即输出总透射谱的包络发生了变化.因此,本文研究了双环级联谐振腔传感器透射谱线的包络拟合方法.通过包络拟合,分析总透射谱包络峰值移动量,将总透射谱主谐振峰的跳跃性变化拟合为包络峰值的连续性变化,进一步提高传感器的探测极限和探测精度.

1 双环级联谐振腔

双环级联谐振腔传感器原理如图1所示,光从输入端输入,经过与参考环和传感环发生谐振的光,从传感器的输出端输出.根据环形谐振腔的理论^[17],光经过参考环谐振腔输出的透射谱为

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

式中, k_1 和 k_2 为参考环两个耦合区的交叉耦合系数, t_1 和 t_2 为直通耦合系数, α_R 和 β 分别为参考环的传输损耗和传播常数, R 为环半径.

传感环的透射谱 T_s 和参考环的透射谱 T_r 形式相同,双环级联透射谱 T ^[11]是两者的乘积,即

$$T = T_r \times T_s \quad (2)$$

双环级联透射谱线如图2所示,因为传感环和参考环的腔长不同,导致它们的自由光谱范围不相等, T_r 和 T_s 的大部分谐振峰交叉错开, T_r 和 T_s 谐振峰重合的位置(图2中星号标注的谐振峰)即为 T 的主谐振峰位置.

假设传感环自由光谱范围 F_s 小于参考环自由

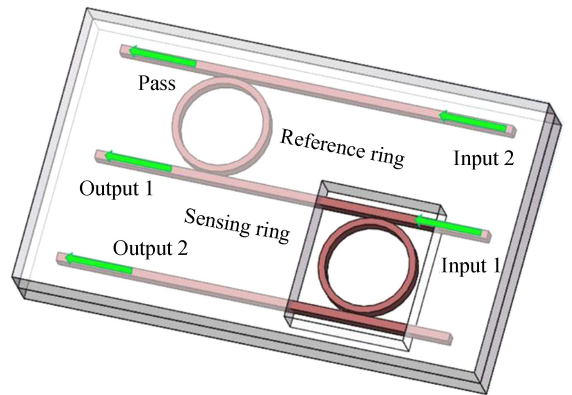


图1 双环级联谐振腔传感器原理

Fig.1 Double-ring cascaded resonator sensor schematic

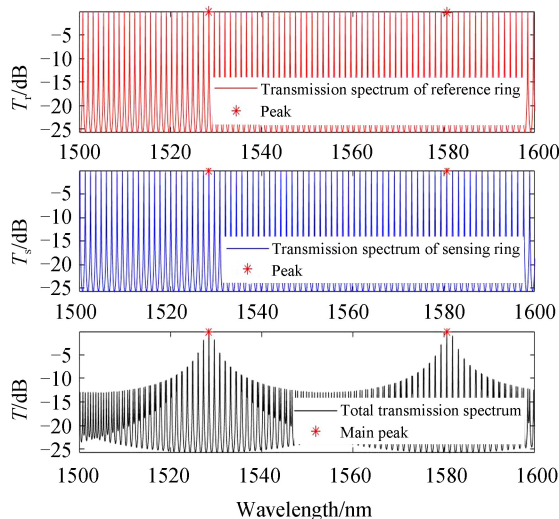


图2 参考环、传感环和双环的透射谱线

Fig.2 Transmission spectrum of reference ring, sensing ring, and double ring

光谱范围 F_r ,通入样品溶液进行传感探测时,参考环上包层未开窗不受样品溶液影响,透射谱 T_r 不变化,传感环上包层开窗,样品溶液改变了传感环波导的有效折射率 n_{eff} ,引起其透射谱往长波方向移动,假设传感环透射谱 T_s 往长波方向的移动量 $\Delta\lambda_s$ 为

$$\Delta\lambda_s = F_s - F_r \quad (3)$$

此时 T_r 和 T_s 之前重合的谐振峰会错开,而其相邻右侧的谐振峰则开始重合,引起双环级联透射谱 T 主谐振峰往长波方向移动一个 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = F_r \quad (4)$$

与单环相比,双环对波长移动产生了一个放大作用,放大系数 F 为

$$F = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_s} = \frac{F_r}{|F_s - F_r|} \quad (5)$$

当被测样品折射率变化引起的传感环透射谱波长移动量 $\Delta\lambda_s < |F_s - F_r|$ 时,同样会引起 T_r 和 T_s 之前重合的谐振峰错开,但其相邻右侧的谐振峰却没有重合,此时 $\Delta\lambda_s$ 为

$$\Delta\lambda_s = m \times |F_s - F_r| + \Delta\lambda_{m+1} \quad (6)$$

式中, m 为自然数, $|\Delta\lambda_{m+1}| < |F_s - F_r|$.

双环级联透射谱线主谐振峰的移动只能探测到 $m \times |F_s - F_r|$ 的波长移动量.为了更准确地探测 $\Delta\lambda_s$,需研究透射谱线包络拟合的方法.

2 透射谱线包络的拟合

2.1 拟合方法

通过传输矩阵计算方法,求解环形谐振腔的透射谱.假设参考环和传感环直通耦合系数 $t_{r1} = t_{r2} = t_{s1} = t_{s2} = 0.95$,参考环半径 $R_r = 130 \mu\text{m}$,传感环半径 $R_s = 127 \mu\text{m}$,理想情况下无损耗 $\alpha_R = 0$,参考环波导有效折射率 $n_{\text{eff}1} = 2.43248$,传感环波导有效折射率 $n_{\text{eff}2} = n_{\text{eff}1} + \Delta n_{\text{eff}}$,其中 Δn_{eff} 为被测样品折射率变化引起的传感环波导有效折射率变化.

由式(1)和式(2)得到参考环和传感环的透射谱 T_r 、 T_s 和双环级联透射谱 T ,利用包络函数拟合双环级联传感器的透射谱.

当传感环的 n_{eff} 发生变化时,传感环透射谱 T_s 谐振峰发生移动,由式(2)可知, T 也会发生变化,对变化的双环级联透射谱 T 包络拟合可得透射谱线移动后包络主谐振峰位置,两个位置的波长差即为折射率变化引起的传感器透射谱线移动量.

对双环级联传感器透射谱的一个主谐振峰包络进行拟合.从图2可知参考环和传感环的自由光谱范围分别为 $F_r = 1.108 \text{ nm}$, $F_s = 1.135 \text{ nm}$,由式(5)可得放大系数 $F = 42.137$.

参考环和传感环的自由光谱范围差为 $F_s - F_r = 0.027 \text{ nm}$,分析可知,当传感器工作方式波长探测时,通过光谱可直接准确测量出传感环的波长移动量的探测极限为 0.027 nm .当被测样品折射率变化引起的传

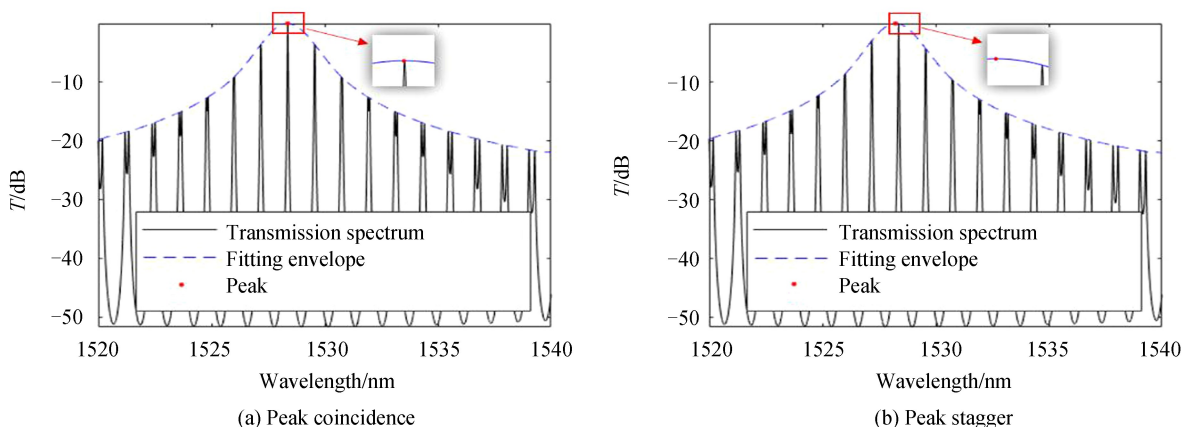


图3 总透射谱及其拟合包络

Fig.3 Total transmission spectrum and its fitting envelope

感环透射谱谐振峰移动量小于 0.027 nm, 双环级联传感器透射谱的主谐振峰位置不改变, 均在 1 528.238 nm, 如图 3, 总透射谱的主谐振峰和各次波峰只是高度发生了变化, 探测不到波长位置的移动, 但通过包络拟合可以明显看出包络峰值位置发生了移动, 从而探测到被测样品折射率微小的变化。

一个透射谱曲线可用多种函数模型进行拟合, 选取了 Gauss、Fourier 和 Sumofsine 三种拟合函数模型, 每种拟合函数模型中, 又选取了不同的参数进行比较, 并加入了插值方法 Smoothingspline 拟合。将 Δn_{eff} 依次设置为 3×10^{-5} , 6×10^{-5} , 9×10^{-5} 和 1.2×10^{-4} , 由式(2)得出双环总透射谱线, 对谱线中 1 526~1 530 nm 的主谐振峰进行拟合, 如图 4。当样品溶液浓度增大(折射率增大)时, 引起传感环透射谱红移, 但是由于 $F_s > F_r$, 双环级联透射谱会发生蓝移。

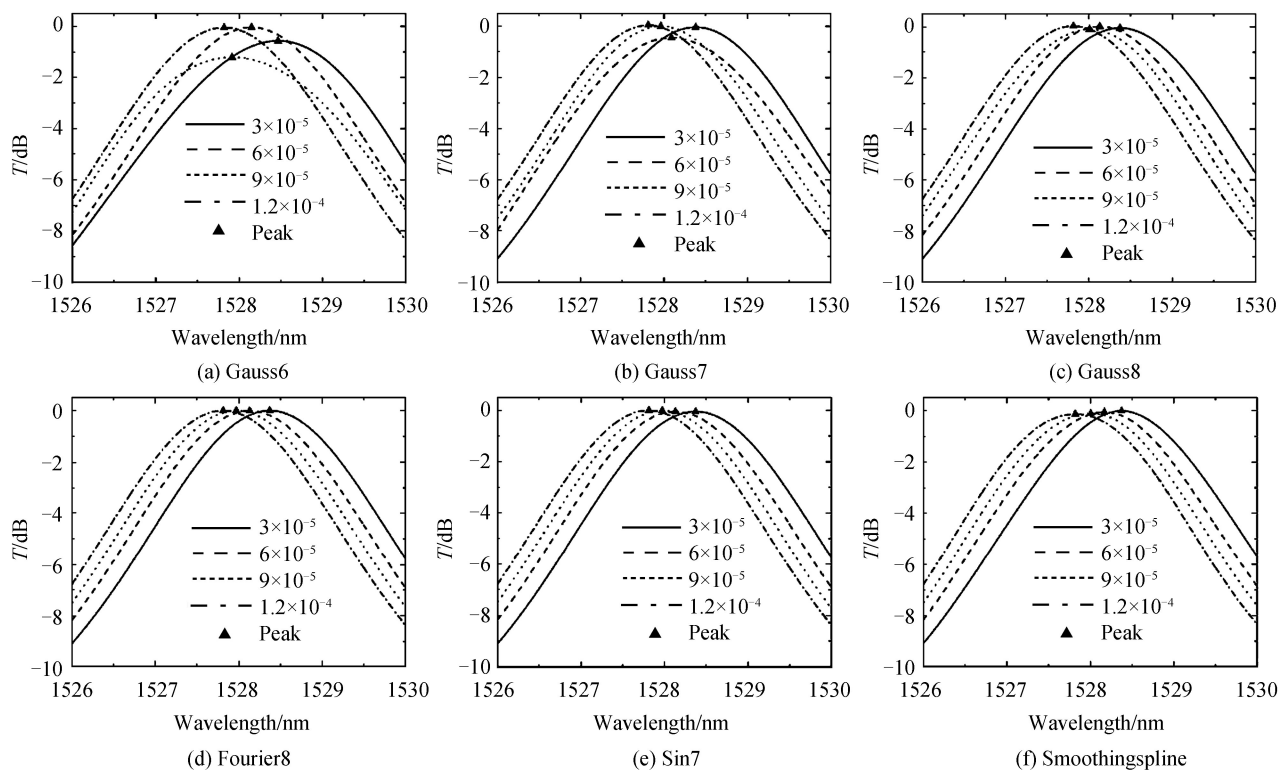


图 4 不同拟合方法得到的拟合包络
Fig.4 Fitting envelopes obtained by different fitting methods

2.2 误差评价

由图 4 可以看到, 选用同一种拟合函数模型, 对于不同的参数, 或者选用不同的拟合函数模型, 得到的拟合效果都不相同。包络拟合时的确定系数 R -square 值越大, 得到的拟合曲线越平滑, 为了定量评价拟合误差, 引入灵敏度误差百分比 φ 。

当被测样品折射率变化引起 n_{eff} 变化 Δn_{eff} , 传感环透射谱线谐振峰发生移动, 记其波长移动量为 $\Delta \lambda_s$, 可得传感环灵敏度 s_s 为

$$s_s = \frac{\Delta \lambda_s}{\Delta n_{\text{eff}}} \quad (7)$$

由游标效应, 理想情况下双环主谐振峰的波长移动量 $\Delta \lambda$ 为

$$\Delta \lambda = \Delta \lambda_s \times F \quad (8)$$

则理想情况下双环灵敏度 S 为

$$S = \frac{\Delta \lambda}{\Delta n_{\text{eff}}} = s_s \times F \quad (9)$$

采用包络拟合方法测得双环主谐振峰的波长移动量记为 $\Delta \lambda'$, 则灵敏度 S' 为

$$S' = \frac{\Delta \lambda'}{\Delta n_{\text{eff}}} \quad (10)$$

由式(9)和式(10)定义灵敏度误差百分比 φ 为

$$\varphi = \frac{|S - S'|}{S} \times 100\% = \frac{|\Delta\lambda - \Delta\lambda'|}{\Delta\lambda} \quad (11)$$

灵敏度误差百分比的大小表征包络拟合的优劣程度。

根据图 4 可计算不同拟合方法测得的灵敏度,四种包络拟合方法的拟合效果见表 1,灵敏度理论值为 130.347 nm/RIU。

表 1 不同拟合方法的理论拟合效果
Table 1 Fitting effect of different fitting methods in theory

Fitting method	R-square	S/(nm · RIU ⁻¹)	φ /%
Gauss8	0.998 89	130.883	0.41
Fourier8	0.999 98	132.217	1.43
Sin7	0.999 69	132.317	1.51
Smoothingspline	0.997 81	140.483	7.78
Unfit	—	195.933	50.75

从表 1 可见,无论采用哪一种拟合方法,其灵敏度误差百分比都远小于未拟合的情况.而四种拟合方法中,Smoothingspline 插值方法的灵敏度误差百分比最大,Fourier8 拟合和 Sin7 拟合效果相近,Gauss8 拟合函数的拟合效果最好,说明在理论模拟中双环透射谱线包络与高斯线型相似度最高。

传感环透射谱谐振峰波长移动量小于 0.027 nm 时,波长探测得出的灵敏度误差大,不可信.通过 Gauss8 拟合函数的包络拟合方法,当传感环透射谱谐振峰波长移动量仅有 0.003 nm 时,求得其灵敏度曲线误差为 0.41%,可见包络拟合方法提高了探测极限。

3 实验验证

基于波长探测的模式,首先测试双环级联谐振腔传感器传感环对 NaCl 溶液的灵敏度 S_s ,以及传感环的 F_s ,然后根据双环级联透射谱,得到未拟合时双环对 NaCl 溶液的灵敏度 S' ,和用包络拟合方法得到的灵敏度 S'' ,以及双环的 FSR.根据 FSR 与 F_s 由式(5)可求出放大系数 F ,根据 F 和 S_s 由式(9)可求出双环的理论灵敏度 S .根据 S 、 S' 和 S'' 由式(11)可求出波长探测时未拟合和包络拟合方法的灵敏度误差百分比,研究不同拟合函数的实际拟合效果。

3.1 实验装置与原理

图 5 为测试双环级联谐振腔传感器的实验框图.实验利用 Keysight Photonic Suite 电脑软件控制可调谐激光器的输出波长范围,控制其输出波长范围为 1 500~1 600 nm,激光通过光栅耦合入双环级联谐振腔传

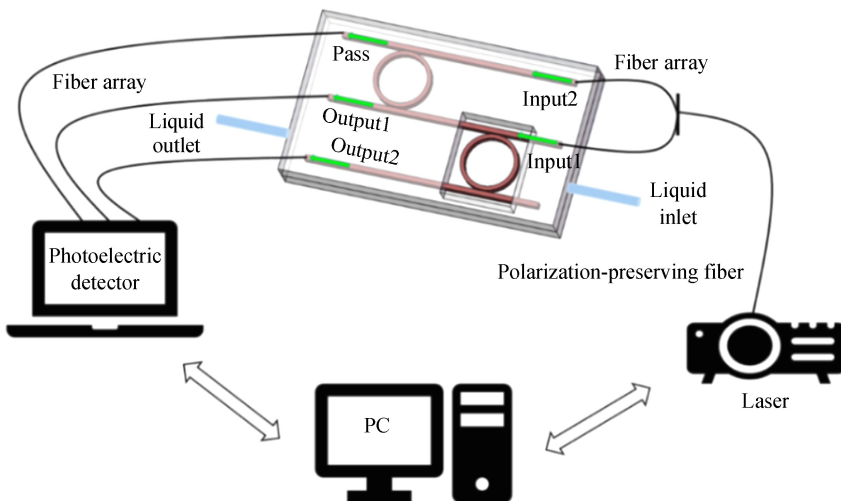


图 5 实验装置框图
Fig.5 Experimental device diagram

感器,输出端通过光栅耦合输出,经光功率计探测可在软件上得到其输出透射谱。

从进样口通入不同浓度的 NaCl 溶液,上包层开窗的传感环受外界溶液影响,其波导有效折射率发生改变,从而引起输出透射谱发生移动.通过读取不同浓度 NaCl 溶液得到的输出透射谱数据,用 MATLAB 对其进行包络拟合,求出拟合包络主谐振峰的移动量,进而测得该双环级联谐振腔传感器的灵敏度。

3.2 实验方法与结果分析

分别配浓度为 3%、4%、5% 和 6% 的 NaCl 溶液,浓度梯度为 1%,对应的梯度折射率变化为 1.8×10^{-3} [18].传感环灵敏度测试方法为:光从 Input1 端口输入,探测 Output1 输出口的透射谱.图 6 为依次通入 3%、4%、5% 和 6% 的 NaCl 溶液时,传感环的 Pass 端透射谱,每个浓度的反应时间为 10 min,通过透射谱可以求得传感环自由光谱范围为 $F_{\text{FS}} = 0.828 \text{ nm}$.单环的透射谱谐振峰为单峰,易求其波长移动量,得到灵敏度曲线如图 7.通过灵敏度曲线可见传感器对于折射率测试具有很好的线性度,其灵敏度为 $S_s = 17.678 \text{ nm/RIU}$.

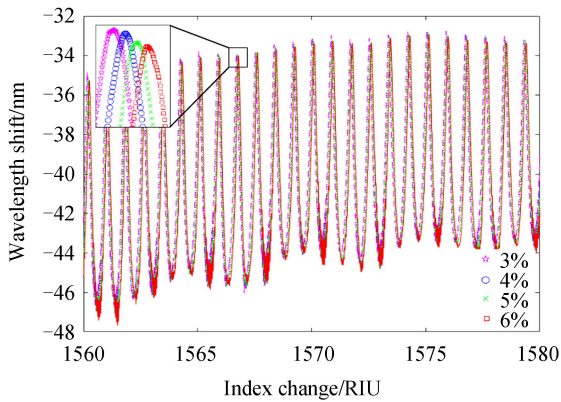


图 6 不同浓度 NaCl 溶液的传感环透射谱

Fig.6 Sensing ring transmission spectrum of different concentrations of NaCl solution

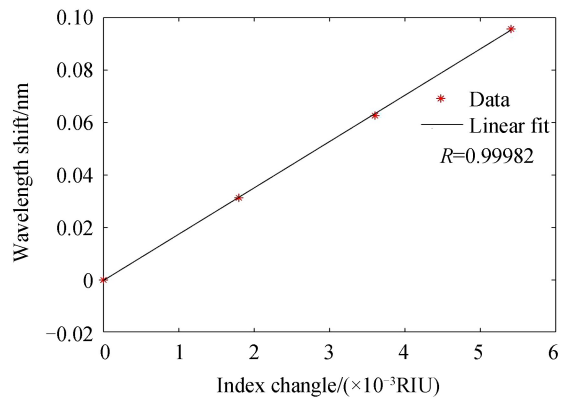


图 7 传感环的灵敏度曲线

Fig.7 Sensing ring sensitivity curve

测试双环级联的透射谱方法为:光从 Input2 端口输入,从 Pass 端口和 Output2 端口输出,Output2 端口输出的为双环级联总透射谱,如图 8.通过包络拟合可以求得双环的自由光谱范围 FSR 和灵敏度 S' ,再由式(5)与式(10)求得放大系数 F 、理论双环灵敏度 S 和灵敏度误差百分比 Φ 。

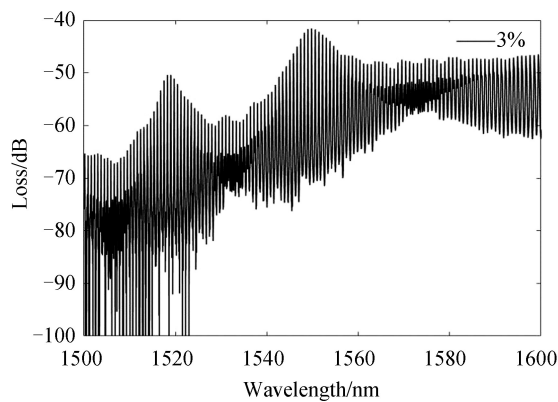


图 8 双环级联透射谱

Fig.8 Double-ring cascaded transmission spectrum

选取透射谱中 1 516~1 525 nm 的主谐振峰,对谱线包络进行拟合,拟合函数模型为 Gauss、Fourier 和 Sumofsine 三种,每种拟合函数模型中,又选取了不同的参数进行比较,并加入了插值方法 Smoothingspline 拟合,以 Φ 为评价标准,发现 Gauss6、Fourier5 和 Sin6 的拟合效果较好,Gauss6、Fourier5、Sin6 和 Smoothingspline 的拟合包络如图 9 所示。

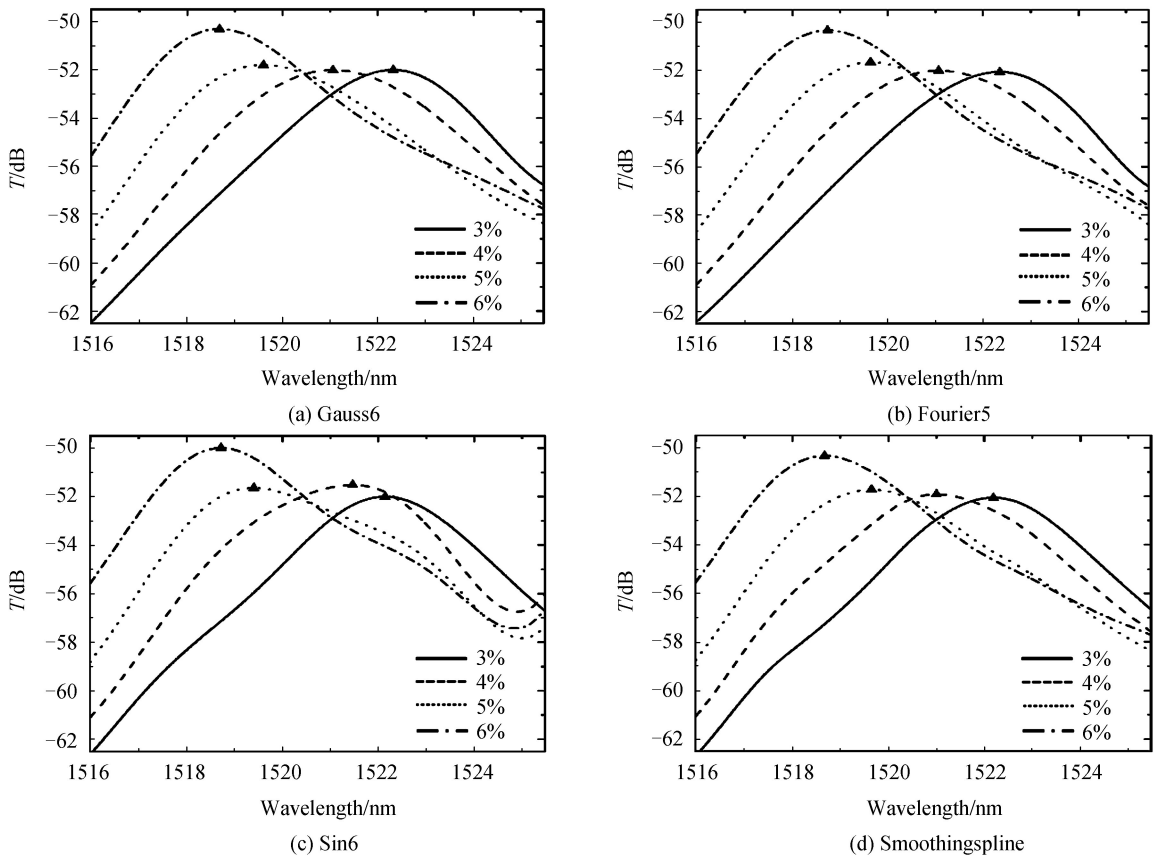


图9 不同浓度 NaCl 溶液的透射谱拟合包络

Fig.9 Transmission spectrum fitting envelope of different concentrations of NaCl solution

用灵敏度误差百分比作为评价标准,由图9的拟合数据可得三种拟合方法、插值方法和未拟合的探测效果见表2.三种拟合函数方法的 Φ 都小于1%,插值拟合方法 Smoothingspline 的 Φ 也仅为2.80%,远小于未拟合的 Φ 14.96%.其中,拟合效果最好的仍为高斯拟合函数模型,与理论结果一致,由此可见,双环级联透射谱线包络近似为高斯线型,采用高斯函数拟合其透射谱包络可以有效提高高波长探测工作模式下的探测精度.

表2 不同拟合方法的实验拟合效果

Fitting method	R-square	S/(nm · RIU ⁻¹)	φ /%
Gauss6	0.998 69	687.778	0.45
Fourier5	0.998 74	681.111	0.76
Sin6	0.988 85	684.444	0.75
Smoothingspline	0.999 59	661.667	2.80
Unfit	—	578.889	14.96

4 结论

本文研究了双环级联谐振腔传感器透射谱的包络拟合方法,以提高探测极限和探测精度.MATLAB 仿真结果表明,当被测样品折射率变化 3×10^{-5} 时,采用包络拟合方法得到的灵敏度最优误差只有0.41%.实验结果表明,Gauss、Fourier 和 Sumofsine 三种拟合函数得到的灵敏度误差都小于1%,相比未拟合的14.96%误差,包络拟合方法优势明显.理论模拟和实验验证均表明双环透射谱线包络与高斯线型相似度最高.

参考文献

[1] BOGAERTS W, HEYN P D, VAERENBERGH T V, et al. Silicon microring resonators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 47-73.
 [2] YAN Chong-yu, GAO Shao-hong, SONG Dong-yu, et al. Characteristic analysis of single and double mirco ring resonant cavity used in Mach-Zehnder interferometer filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(7): 0713003.

- 晏崇宇, 高劭宏, 宋东雨, 等. 单环和双环微环谐振应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器的特性分析[J]. 光子学报, 2015, **44**(7): 0713003.
- [3] HAO Xiang-yu, MENG Yi-chao, LI Zhuo-yan. Design of Mach-Zehnder interferometer type optical interleaver based on half-band digital filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(s1): 54-60.
郝祥雨, 孟义朝, 李卓岩. 基于半带数字滤波器的马赫-曾德干涉仪型波长交错滤波器的设计[J]. 光子学报, 2017, **46**(s1): 54-60.
- [4] ZHANG Yuan-jue, LI Yu, CHEN Ming-hua. Narrow linewidth single frequency fiber laser based on high-Q silicon nitride microring reflector[J]. *ZTE Technology Journal*, 2017, **23**(5): 34-37.
章元珏, 李渔, 陈明华. 基于高 Q 值氮化硅微环反射镜的窄线宽单模光纤激光器[J]. 中兴通讯技术, 2017, **23**(5): 34-37.
- [5] LIU Yi, TONG Xiao-gang, YU Jin-long, *et al.* All-optical switching in Silicon-on-Insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(2): 164-170.
刘毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. 中国激光, 2013, **40**(2): 164-170.
- [6] HAN Xiao-nan, HAN Xiu-you, SHAO Yu-chen, *et al.* Study on polymer microring optical biosensor based on slot waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(4): 0413001.
韩笑男, 韩秀友, 邵宇辰, 等. Slot 结构聚合物波导微环光学生物传感器研究[J]. 光学学报, 2016, **36**(4): 0413001.
- [7] CHEN Y, YU F, YANG C, *et al.* Label-free biosensing using cascaded double-microring resonators integrated with microfluidic channels[J]. *Optics Communications*, 2015, **344**: 129-133.
- [8] CHEN Y, LI M. Microfluidics-integrated cascaded double-microring resonators for Label-Free Biosensing[J]. *Spie/cos Photonics Asia*, 2014, **9268**: 926829.
- [9] BOGAERTS W, HEYN P. Silicon microring resonators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, **6** (1): 47-73.
- [10] LI Yu-bo, YUE Ping-yuan, CHEN Jian-qi, *et al.* Dual-microring resonator sensor for nanoparticle detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(9): 0923001.
李宇波, 岳平原, 陈剑奇, 等. 用于纳米粒子检测的双环谐振器[J]. 光子学报, 2016, **45**(9): 0923001.
- [11] JIN Lei, LI Ming-yu, HE Jian-jun. Highly-sensitive optical sensor using two cascaded-microring resonators with Vernier effect[C]. Asia Communications and Photonics Conference (ACP2009), Shanghai, November 2-6, 2009: TuM4.
- [12] JIN Lei, LI Ming-yu, HE Jian-jun. Experimental investigation of waveguide sensor based on cascaded-microring resonators with Vernier effect[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2010), San Jose, CA, May 16-21, 2010: JWA84.
- [13] JIN Lei, LI Ming-yu, HE Jian-jun. Highly-sensitive silicon-on-insulator sensor based on two cascaded micro-ring resonators with vernier effect[J]. *Optics Communications*, 2011, **284** (1): 156-159.
- [14] JIN Lei, LI Ming-yu, HE Jian-jun. Optical waveguide double-ring sensor using intensity interrogation with low-cost broadband source[J]. *Optics Letters*, 2011, **36** (7): 1128-1130.
- [15] JIN Lei, LI Ming-yu, HE Jian-jun. Analysis of wavelength and intensity interrogation methods in cascaded double-ring sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30** (12): 1994-2002.
- [16] 金磊. 基于 SOI 的级联双环谐振腔光波导传感器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 54-74.
- [17] YARIV A, PALOCZI G T, SCHEUER J, *et al.* Matrix analysis of microring coupled-resonator optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(1): 90-103.
- [18] LIDE D R. Handbook of chemistry and physics[M]. CRC Press, 2000: 8-77.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No.61535010), Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LY16F050001), National High Technological Research and Development Program of China (No.2014AA06A504)

引用格式: SU Chang, ZHU Hui-hui, CAO Zi-wei, *et al.* Fitting Methods of Transmission Spectrum Envelope in Cascaded Double-ring Resonator Sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1023002

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