

基于全相位滤波技术的光纤表面等离子体共振传感解调算法

曹玉珍 马金英 刘琨 黄翔东 江俊峰 王涛 薛萌 刘铁根

Optical fiber SPR sensing demodulation algorithm based on all-phase filters

Cao Yu-Zhen Ma Jin-Ying Liu Kun Huang Xiang-Dong Jiang Jun-Feng Wang Tao Xue Meng  
Liu Tie-Gen

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 074202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.074202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于气象观测的阵列式温度传感器流体动力学分析与实验研究

[Fluid dynamic analysis and experimental study of a temperature sensor array used in meteorological observation](#)

物理学报.2016, 65(9): 094209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094209>

分布式光纤 Sagnac 干涉仪中基于倒谱的多分辨率入侵定位算法

[Multi-resolution intrusion localization algorithm through cepstrum in distributed fiber optic Sagnac interferometer](#)

物理学报.2016, 65(4): 044210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044210>

准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器特性研究

[Quasi-crystal photonic fiber surface plasmon resonance sensor](#)

物理学报.2015, 64(6): 064213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064213>

一种基于微波谐振测量 Sagnac 效应的新方案

[A new scheme of measuring Sagnac effect based on microwave resonant](#)

物理学报.2015, 64(4): 044205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044205>

基于辅助电介质层的棱镜表面等离子体共振效应研究

[Study of prism surface plasmon resonance effect based on dielectric-aided layer](#)

物理学报.2014, 63(3): 034207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034207>

专题: 光纤传感

# 基于全相位滤波技术的光纤表面等离子体 共振传感解调算法\*

曹玉珍<sup>1)</sup> 马金英<sup>1)</sup> 刘琨<sup>1)2)†</sup> 黄翔东<sup>3)</sup> 江俊峰<sup>1)2)</sup> 王涛<sup>1)2)</sup>  
薛萌<sup>1)2)</sup> 刘铁根<sup>1)2)</sup>

1)(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

2)(光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

3)(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

(2016年10月9日收到; 2017年1月5日收到修改稿)

基于生物样品检测对折射率传感的迫切需求, 构建一种全光纤表面等离子体共振(surface plasmon resonance, SPR)系统, 并针对其设计了基于全相位滤波技术的SPR特征波长传感解调算法. 基于系统仿真, 理论计算了光纤SPR传感器的折射率传感灵敏度. 采用全相位滤波技术提取光纤SPR传感器透射光谱的特征波长, 理论推导了全相位滤波器的解析表达式. 实验结果表明, 使用本算法的光纤SPR传感器折射率传感灵敏度为1640.4 nm/RIU, 折射率检测的分辨率是 $7.36 \times 10^{-4}$  RIU, 与传统方法相比, 有效提高了系统的检测精度和抗光源扰动性能, 降低了实验成本.

**关键词:** 光纤SPR传感器, 全相位滤波, 解调算法, 生物传感

**PACS:** 42.81.Pa, 07.60.Vg, 87.55.kd, 87.64.K-

**DOI:** 10.7498/aps.66.074202

## 1 引言

光纤传感器具有体积小、重量轻、测量灵敏度高、复用能力强、抗电磁干扰、易于嵌入材料内部等诸多优点, 在航空航天、石化、电力、土木工程等领域有着广泛的应用前景<sup>[1]</sup>. 国内外在分立式光纤传感技术和分布式光纤传感技术两个方面开展相关研究工作, 可实现温度<sup>[2]</sup>、应变<sup>[3]</sup>、压力<sup>[4]</sup>、气体<sup>[5]</sup>、振动等<sup>[6]</sup>多物理量传感检测. 自从20世纪初, Wood首先在实验中发现表面等离子体共振(surface plasmon resonance, SPR)现象以来<sup>[7]</sup>, SPR技术逐渐成为光学领域的一大研究热点, 在生物、化学、物理等多个学科都得到了广泛应用<sup>[8]</sup>. 1993年, Jorgenson等<sup>[9]</sup>提出了以光纤为载体的SPR传感器, 由于其对折射率<sup>[10]</sup>、温度等<sup>[11]</sup>

参数敏感, 且具有尺寸微小、响应速度快、易于结合微流通道等优势<sup>[12]</sup>, 使得小型化和远距离实时SPR传感成为可能, 可为生物医药领域提供更好的解决方案. 与传统棱镜型SPR传感器相比, 光纤SPR传感器的应用范围和发展前景更加广阔.

光纤SPR传感解调的关键是对其透射光谱的特征波长提取. 传统的棱镜型SPR传感系统采集到的光谱曲线具有半峰宽窄、共振峰尖锐等特点<sup>[13]</sup>, 而光纤型SPR传感器的透射光谱恰恰不具备这些特点. 因此, 棱镜型SPR传感器通常采用的质心法<sup>[14]</sup>不适应于光纤SPR传感器. 而由于光纤型SPR传感器透射光谱的不对称性, 使得采用高斯线型拟合的方法获得特征波长时具有较大的拟合误差<sup>[13]</sup>.

本文针对这一难题, 开发了一种基于全相位滤波技术的SPR特征波长传感解调算法. 在系统模

\* 国家自然科学基金(批准号: 61475114, 61227011)和国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2013YQ030915)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: beiyangkl@tju.edu.cn

型仿真的基础上, 理论计算了光纤 SPR 传感器的折射率传感灵敏度, 推导了全相位滤波器的解析表达式. 采用自制的光纤 SPR 传感器开展不同浓度的酒精折射率传感实验, 结果表明, 与传统方法相比, 本算法有效提高了系统的检测精度和抗光源扰动性能, 降低了实验成本.

## 2 全光纤 SPR 传感系统

全光纤 SPR 传感系统如图 1 所示, 由卤素灯光源、全光纤 SPR 传感器、光谱仪以及计算机构成, 其中光纤 SPR 传感器放置在待测介质中. 光谱仪采集到的是光源通过光纤 SPR 传感器后的透射光谱.

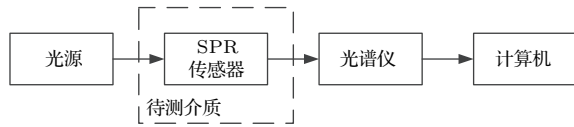


图 1 全光纤 SPR 传感系统

Fig. 1. All fiber SPR sensing system.

全光纤 SPR 传感器的结构如图 2 所示, 为三层混叠结构. 内层为光纤芯层, 其介电常数  $\epsilon_0 = n_0^2$ , 其中  $n_0$  为光纤芯层折射率; 中间层为金属层, 其介电常数为  $\epsilon_m$ ; 外层为传感介质层, 其介电常数为  $\epsilon_s$ . 若光纤芯层中传播的光束入射角为  $\theta$ 、波长为  $\lambda$ , 则激发的表面等离子体波产生共振的条件为 [15,16]

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_0 \sin \theta = \text{Re} \{K_{\text{sp}}\} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_s}{\epsilon_m + \epsilon_s}}, \quad (1)$$

其中  $K_{\text{sp}}$  为表面等离子体波的传播常数.

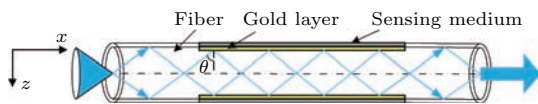


图 2 全光纤 SPR 传感器结构

Fig. 2. Structure of all fiber SPR sensor.

对于图 2 所示的全光纤 SPR 传感器结构, 其有效透射谱传输函数为

$$P_{\text{trans}} = \frac{\int_{\theta_{\text{cr}}}^{\pi/2} R_p^{N_{\text{ref}}(\theta)} P(\theta) d\theta}{\int_{\theta_{\text{cr}}}^{\pi/2} P(\theta) d\theta}, \quad (2)$$

其中  $R_p$  为反射比, 是入射角为  $\theta$ , 芯层直径  $d$  以及  $\epsilon_0, \epsilon_m, \epsilon_s$  的函数 [15]; 反射次数  $N_{\text{ref}}(\theta) = L/(d \cdot \tan \theta)$ , 其中  $L$  为 SPR 传感器传感区域的长度; 光纤端面上光信号功率的分布函数  $P(\theta) =$

$\epsilon_0 \sin \theta \cos \theta / (1 - \epsilon_0 \cos^2 \theta)^2$ ; 光纤芯层全反射的临界角  $\theta_{\text{cr}} = \sin^{-1}(n_{\text{cl}}/n_0)$ , 其中  $n_{\text{cl}}$  为光纤包层折射率.

根据光纤 SPR 传感器的理论模型 [15], 研究当待测介质的折射率从 1.33 渐变至 1.34 时, 计算光纤 SPR 传感器相应的透射传输曲线, 理论分析传感器的传输特性. 参照该理论模型, 设定相关参数, 其中光纤 SPR 传感器的纤芯直径为 600  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.24, 传感器的长度为 15 mm, 所镀金膜的厚度为 35 nm. 考虑到光纤纤芯的色散, 其折射率随波长的变化关系满足 Sellmeier 色散公式 [16]. 考虑到金属的色散, 其介电系数随波长的变化关系满足 Drude 模型 [15]. 考虑到在光纤 SPR 传感器范围内光信号发生多次全反射, 其结果如图 3 (a) 所示. 由图可知, 由于表面等离子体共振现象的存在, 光纤 SPR 传感器的透射光谱具有明显的陷波滤波特性; 且当待测介质的折射率增大时, SPR 传感器的透射光谱陷波波长发生了明显红移.

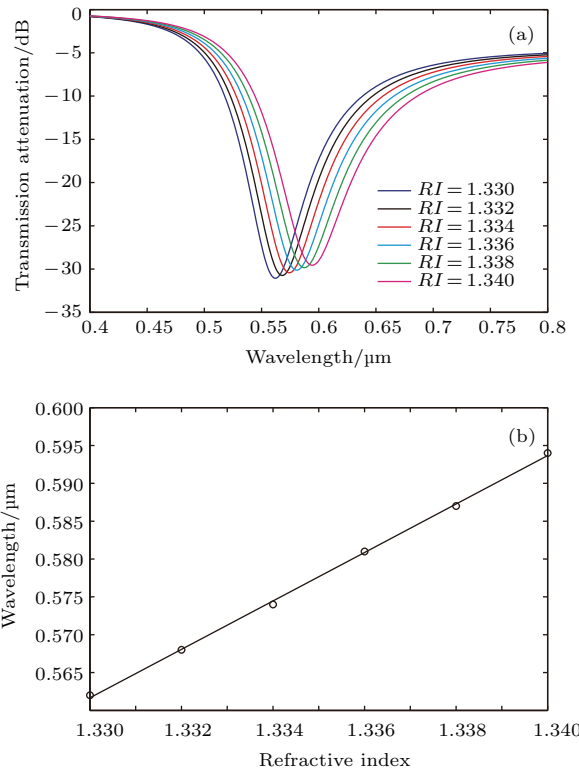


图 3 光纤 SPR 传感器的透射传输衰减特性曲线 (a) 不同折射率对应的透射传输曲线; (b) 特征波长与折射率之间的关系

Fig. 3. The transmission attenuation characteristic curve of the fiber SPR sensor: (a) The transmission curve corresponding to different refractive index; (b) the relationship between characteristic wavelength and refractive index.

提取不同折射率条件下的SPR传感器透射光谱特征波长, 其与待测介质折射率之间为线性对应关系, 如图3(b)所示. 拟合曲线的斜率即为光纤SPR传感器的折射率传感灵敏度, 依照上述模型数据理论计算值为3200 nm/RIU.

### 3 全相位滤波算法

系统中, 光谱仪实际采集到的透射光谱是图3(a)所示光纤SPR传感器透射传输衰减曲线与卤素灯光源光谱曲线的卷积, 再加上系统中存在的光学和电路噪声<sup>[12]</sup>, 导致传感器的光谱特征波长提取困难. 本文设计一种全相位微分滤波器, 用于提取光纤SPR传感器的特征波长.

微分滤波器能够反映数据中变化比较剧烈的部分即高频分量比较集中的数据段, 常用于图像边缘提取<sup>[17,18]</sup>. 微分滤波器的意义相当于求导, 因此数据经过微分滤波器的输出在一定程度上能够反映出数据的导数. 鉴于导数的FFT频域分量与原函数的FFT频域分量相差一个线性项 $j\omega$ , 因此所设计的微分滤波器应为一个具有线性幅频特性的滤波器.

设定一个长度为 $N$ 、幅值为 $\pi$ 的线性三角波频率向量 $H$

$$H = \begin{cases} 2\pi \frac{n}{N}, & 0 \leq n \leq N/2, \\ 2\pi \left(1 - \frac{n}{N}\right), & N/2 + 1 \leq n \leq N - 1, \end{cases} \quad (3)$$

则该频率向量的逆傅里叶变换表达式 $h(n)$ 为

$$h(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn} = \begin{cases} \pi/2, & n = 0, \\ \frac{2\pi e^{j\frac{2\pi n}{N}} (1 - e^{j\pi n})^2}{N^2 \left(1 - e^{j\frac{2\pi n}{N}}\right)^2}, & 1 \leq n \leq N - 1. \end{cases} \quad (4)$$

对上式进行定义域延拓, 将 $n$ 的取值范围从 $[0, N - 1]$ 延拓到 $[-N + 1, N - 1]$ , 可得滤波器系数为

$$h(n) = \begin{cases} \pi/2, & n = 0, \\ \frac{2\pi e^{j\frac{2\pi n}{N}} (1 - e^{j\pi n})^2}{N^2 \left(1 - e^{j\frac{2\pi n}{N}}\right)^2}, & n \in [-N + 1, -1] \cup [1, N - 1]. \end{cases} \quad (5)$$

为了保证滤波器具有通带平坦、阻带衰减大的频率传输特性, 对上式进行加窗处理. 选择 Hamming 窗  $w_c(n) = 0.54 - 0.46 \cos(2\pi \cdot n/N)$ , 则加窗处理后归一化的滤波器 $g(n)$ 为

$$g(n) = h(n) \cdot w_c(n) = \begin{cases} \frac{2\pi e^{j\frac{2\pi n}{N}} (1 - e^{j\pi n})^2}{N^2 \left(1 - e^{j\frac{2\pi n}{N}}\right)^2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n+N} w_c(i)}{\sum_{i=1}^N w_c(i)}, & -N + 1 \leq n \leq -1, \\ \pi/2, & n = 0, \\ \frac{2\pi e^{j\frac{2\pi n}{N}} (1 - e^{j\pi n})^2}{N^2 \left(1 - e^{j\frac{2\pi n}{N}}\right)^2} \cdot \frac{\sum_{i=n+1}^N w_c(i)}{\sum_{i=1}^N w_c(i)}, & 1 \leq n \leq N - 1, \end{cases} \quad (6)$$

(6) 式即为微分滤波器 $g(n)$ 的解析表达式.

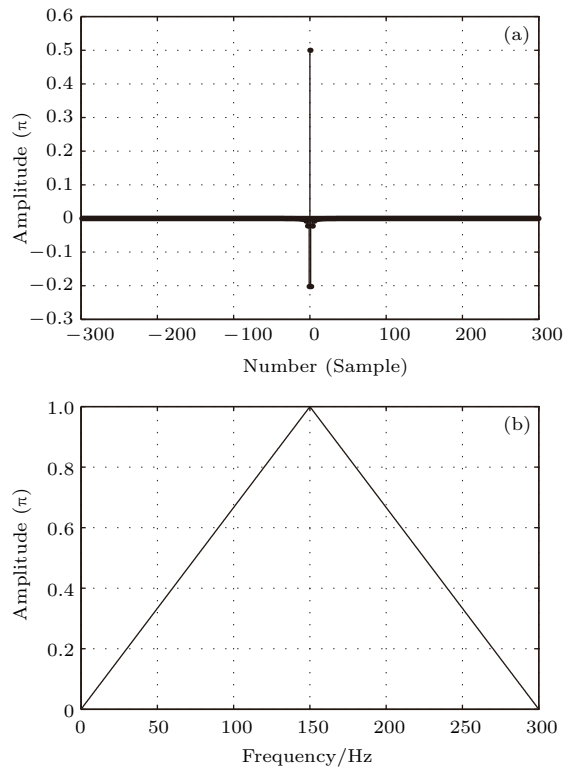


图4 微分滤波器 $g(n)$ 的时域滤波特性曲线和幅频响应曲线 (a) 微分滤波器 $g(n)$ 的时域滤波特性曲线; (b) 微分滤波器 $g(n)$ 的幅频响应曲线

Fig. 4. The time domain filtering characteristic curve and amplitude-frequency curve of the differential filter  $g(n)$ : (a) The time domain filtering characteristic curve of the differential filter  $g(n)$ ; (b) the amplitude-frequency curve of the differential filter  $g(n)$ .

当  $N = 300$  时, 微分滤波器  $g(n)$  的时域滤波特性曲线和幅频响应曲线如图 4 所示. 由图 4(a) 可知, 该滤波器是长度为 599 的一维时域滤波器组, 其在时域上具有极窄的带通特性; 由图 4(b) 可知, 该滤波器的幅频响应具有很好的线性特性, 同时, 该滤波器的相频响应覆盖了  $[-\pi, \pi]$  范围. 因此, 该滤波器是一款全相位微分滤波器<sup>[19]</sup>, 具有无需相位校正、计算复杂度低等特点.

根据图 4(b) 所示微分滤波器  $g(n)$  的幅频响应可知, 该滤波器能够有效放大高频分量并抑制低频分量. 图 1 中光谱仪采集到的光谱实际上是卤素灯光源光谱和光纤 SPR 传感器透射传输衰减曲线的卷积. 由于光纤 SPR 传感器的透射光谱下降沿和上升沿都具有较为丰富的频率分量特别是高频分量, 因此当该透射光谱经微分滤波器  $g(n)$  滤波后, 能够有效突出光纤 SPR 传感器的陷波波谷位置, 用于 SPR 特征波长提取.

#### 4 实验与分析

为了验证本算法的有效性, 构建如图 1 所示的系统, 开展不同浓度酒精的 SPR 透射光谱特征波长提取实验. 实验现场的照片如图 5 所示, 其中卤素灯光源 HL-2000 的光谱范围为 350—2200 nm, 标称灯泡功率为 5 W. 光纤 SPR 传感器为采用真空蒸镀技术自制而成, 其中 99.999% 纯金的膜层厚度为 35 nm 左右. 光谱仪采用的是海洋光学的 HR4000CG 型红外光谱仪, 其光谱扫描范围为 200—1100 nm, 波长分辨率为 0.75 nm. 计算机通过 OceanView 软件控制光谱仪并记录光谱数据.

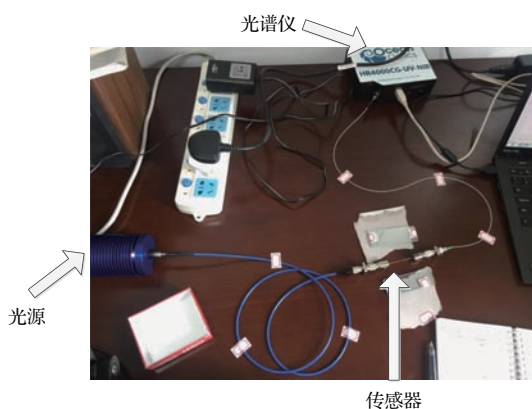


图 5 全光纤 SPR 传感系统实验现场照片

Fig. 5. The experimental picture of the all fiber SPR sensing system.

系统采集到的光纤 SPR 传感器透射光谱如图 6(a) 所示. 由于原始光谱不可避免地引入了各种噪声, 导致检测精度下降<sup>[12]</sup>. 采用 dB4 小波对其进行六层分解, 滤波后降噪重构, 可得如图 6(b) 中实线所示的光谱. 利用 (4) 式表达的微分滤波器对降噪后的光谱进行滤波处理, 所得全相位滤波信号如图 6(b) 中虚线所示. 由图可知, 全相位滤波后的信号与原始信号相比, 可以很容易地提取透射光谱的特征波长. 当滤波器波长  $N < 200$  时, 全相位滤波后的信号周期变化较快; 当  $N > 200$  时, 全相位滤波后的信号周期性变化不大, 故取  $N = 300$ .

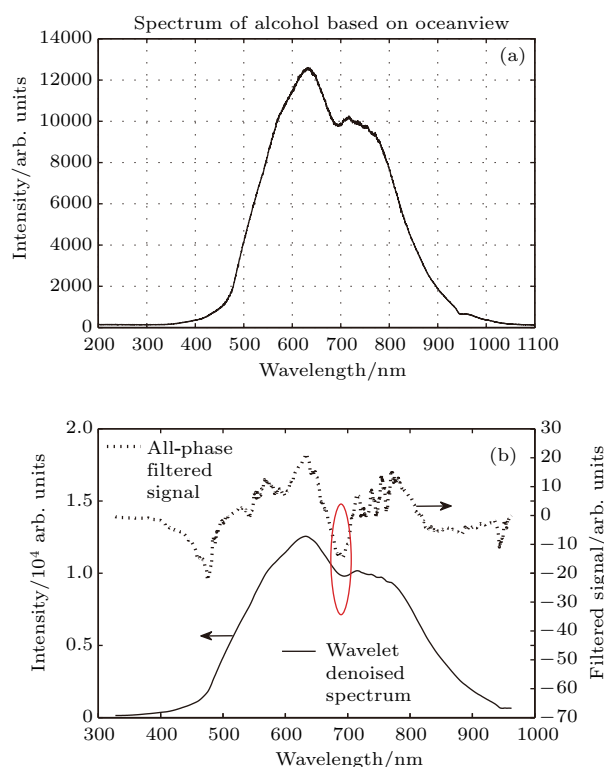


图 6 基于全相位滤波算法的光纤 SPR 传感器特征波长提取 (a) 光谱仪采集到的 SPR 透射光谱; (b) 光纤 SPR 传感器特征波长提取

Fig. 6. The characteristic wavelength extraction of the fiber SPR sensor based on all-phase filters algorithm: (a) The transmission spectrum of the SPR sensor acquired by spectrometer; (b) the characteristic wavelength extraction of the fiber SPR sensor.

改变酒精的浓度, 通过图 5 所示的实验系统采集光纤 SPR 传感器透射光谱, 每个浓度采集光谱 10 次; 同时利用阿贝折射仪观测对应的溶液折射率值. 基于上述算法提取对应的特征波长, 10 次测量的平均特征波长与溶液折射率之间的关系如图 7 所示, 二者之间线性拟合的斜率即折射率传感的灵敏度为 1640.4 nm/RIU, 拟合误差 2.28 nm. 由于酒精在测量过程中挥发等因素, 故未采用配比溶

液的浓度值,而是采用了实际观测的溶液折射率用于数据拟合.

将本算法与传统的质心法<sup>[14]</sup>和高斯拟合法<sup>[13]</sup>进行比较,同一浓度酒精对应的不同解调算法10次实验的特征波长标准差如表1所列.其中全相位滤波算法的标准差最小,质心法的标准差较大,高斯拟合算法的标准差突变很大且线性拟合时拟合误差较大.

不同算法下10次测量的平均特征波长与溶液折射率之间的线性拟合结果如表2所列.由于不同算法提取的特征波长位置不同,导致传感灵敏度有所差别;且由于实际光纤SPR传感器的纤芯直径和数值孔径的不同,导致拟合结果与数值仿真的结果存在差异,但二者量级相同.三种拟合算法的拟合误差接近,平均解调时间质心法最短,而高斯拟合的解调时间最长.由于质心法和高斯拟合法解调时特征波长的标准差较大,导致本文所述全相位滤

波算法的折射率检测分辨率比传统方法高出近一个数量级.此外,质心法和高斯拟合法还需借助于光源背景光谱作为参考实施解调,而本算法可以直接从传感器透射光谱中提取SPR特征波长.

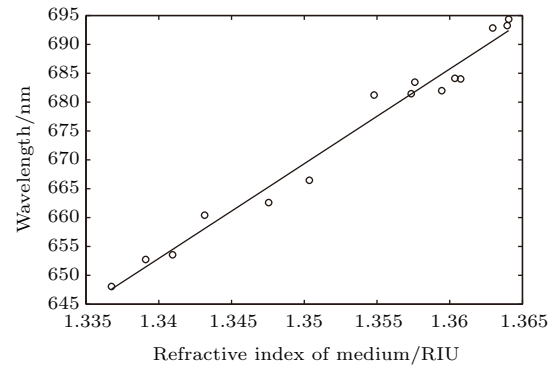


图7 折射率和光纤SPR传感器特征波长之间的线性拟合

Fig. 7. The linearity fitting between the refractive index and the characteristic wavelength of the fiber SPR sensor.

表1 不同解调算法10次实验的标准差(单位: nm)

Table 1. The deviation of different demodulation algorithm for 10 times experiments (unit: nm).

折射率/RIU	1.33675	1.33910	1.34095	1.34315	1.34755	1.35035	1.35480	1.35735
全相位滤波	1.207	0.023	0	0	0.054	0.023	0	0.121
质心法	1.214	7.653	5.165	0.044	1.352	1.431	0.559	0.085
高斯拟合法	0	0.001	0.001	8.715	0.001	0.001	8.474	0.001
折射率/RIU	1.35760	1.35945	1.36035	1.36075	1.36295	1.36395	1.36405	
全相位滤波	0.254	0	0.618	0.872	0.006	0.144	0.287	
质心法	10.216	0.282	6.316	3.538	1.901	7.134	3.119	
高斯拟合法	0.001	0.003	0.001	0.003	14.328	0.002	0.002	

表2 不同解调算法拟合结果比较

Table 2. The comparison of fitting results for different demodulation algorithm.

	传感灵敏度/nm	拟合误差/nm	平均解调时间/ms	折射率分辨率/RIU
全相位滤波	1640.4	2.28	157	$7.36 \times 10^{-4}$
质心法	1887.4	2.15	3	$5.41 \times 10^{-3}$
高斯拟合法	2026.4	2.33	524	$7.1 \times 10^{-3}$

## 5 结 论

本文针对光纤SPR传感解调时透射光谱特征波长提取的难题,开发了一种基于全相位滤波技术的SPR特征波长传感解调算法.在系统

设计及模拟仿真的基础上,理论推导了全相位滤波器的解析表达式.基于自制的光纤SPR传感器开展不同浓度的酒精折射率传感实验,结果表明,本算法的光纤SPR传感器折射率传感灵敏度为1640.4 nm/RIU,折射率检测的分辨率是 $7.36 \times 10^{-4}$  RIU,较传统方法提高了近一个数量级.

## 参考文献

- [1] Liu T G, Wang S, Jiang J F, Liu K, Yin J D 2014 *Chin. J. Sci. Instrum.* **35** 1681 (in Chinese) [刘铁根, 王双, 江俊峰, 刘琨, 尹金德 2014 仪器仪表学报 **35** 1681]
- [2] Jiang J F, Yan J L, Wang S, Liu K, Liu T G, Zang C J, Xie R W, He P, Chu Q L, Pan Y H 2016 *Acta Opt. Sin.* **2** 1 (in Chinese) [江俊峰, 闫金玲, 王双, 刘琨, 刘铁根, 臧传军, 谢仁伟, 河盼, 楚奇梁, 潘玉恒 2016 光学学报 **2** 1]
- [3] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M 1990 *Appl. Opt.* **29** 2219
- [4] Jiang J F, Wang S H, Liu T G, Liu K, Yin J D, Meng X E, Zhang Y M, Wang S, Qin Z Q, Wu F, Li D J 2012 *Opt. Express* **20** 18117
- [5] Yu L, Liu T G, Liu K, Jiang J F, Wang T 2016 *Sensor. Actuat. B: Chem.* **228** 10
- [6] Chen Q, Liu T G, Liu K, Jiang J F, Shen Z, Ding Z Y, Hu H F, Huang X D, Pan L, Ma C Y 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 1954
- [7] Wood R W 1902 *Philos. Mag.* **4** 396
- [8] Wu Y, Ho H P, Wong C L, Kong S K, Lin C L 2007 *IEEE Sens. J.* **7** 70
- [9] Jorgenson R C 1993 *Ph. D. Dissertation* (Washington: University of Washington)
- [10] Zeng J, Liang D K, Zeng Z W, Du Y 2006 *Spectrosc. Spect. Anal.* **26** 723 (in Chinese) [曾捷, 梁大开, 曾振武, 杜燕 2006 光谱学与光谱分析 **26** 723]
- [11] Wang T, Liu T G, Liu K, Jiang J F, Yu L, Xue M, Meng Y X 2016 *IEEE Photon. J.* **8** 6803008
- [12] Zhao Z Y, Zeng J, Liang D K, Zhang X L 2009 *Spectrosc. Spect. Anal.* **29** 3096 (in Chinese) [赵志远, 曾捷, 梁大开, 张晓丽 2009 光谱学与光谱分析 **29** 3096]
- [13] Zhou P, Zhang W B, Wang J X, Sun C Y, Liu J, Su R X, Wang X M 2016 *Spectrosc. Spect. Anal.* **36** 1949 (in Chinese) [周鹏, 张文斌, 王军星, 孙翠迎, 刘瑾, 苏荣欣, 王学民 2016 光谱学与光谱分析 **36** 1949]
- [14] Johansen K, Stålberg R, Lundström I, Liedberg B 2000 *Meas. Sci. Technol.* **11** 1630
- [15] Anuj K S, Gupta B D 2005 *Opt. Commun.* **245** 159
- [16] Sarika S, Navneet K S, Vivek S 2016 *Braz. J. Phys.* **46** 288
- [17] Francine C, Pierre L L, Jean M M, Tomeu C 1992 *Siam. J. Numer. Anal.* **29** 182
- [18] David T 2006 *Int. J. Comput. Vision* **68** 65
- [19] Huang X D, Jing S X, Wang Z H, Xu Y, Zheng Y Q 2016 *IEEE Trans. Signal Proc.* **64** 1173

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

# Optical fiber SPR sensing demodulation algorithm based on all-phase filters\*

Cao Yu-Zhen<sup>1)</sup> Ma Jin-Ying<sup>1)</sup> Liu Kun<sup>1)2)†</sup> Huang Xiang-Dong<sup>3)</sup> Jiang Jun-Feng<sup>1)2)</sup>  
Wang Tao<sup>1)2)</sup> Xue Meng<sup>1)2)</sup> Liu Tie-Gen<sup>1)2)</sup>

1) (*School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin 300072, China*)

2) (*Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology, EMC, Tianjin 300072, China*)

3) (*School of Electronics Information Engineering, Tianjin 300072, China*)

( Received 9 October 2016; revised manuscript received 5 January 2017 )

## Abstract

Aiming at the urgent requirements for refractive index detection in the biological sample detection area, an all-fiber surface plasmon resonance (SPR) system is established in this paper. And the SPR characteristic wavelength demodulation algorithm is proposed for this system based on all-phase filter technique. According to the system simulation, the refractive index sensing sensitivity of the fiber SPR sensor can be calculated theoretically. By using the all-phase filter technique, the characteristic wavelength of the fiber SPR sensor can be extracted, and the theoretically analytical expression of the all-phase filter can be obtained. The experimental results show that the refractive index sensing sensitivity and the detection resolution of the fiber SPR sensor are 1640.4 nm/RIU and  $7.36 \times 10^{-4}$  RIU respectively by using this algorithm. Compared with the traditional methods, our algorithm can improve the detection precision and the anti-light-disturbance performance and reduce the costs as well.

**Keywords:** fiber surface plasmon resonance sensor, all-phase filter, demodulation algorithm, biological sensing

**PACS:** 42.81.Pa, 07.60.Vg, 87.55.kd, 87.64.K-

**DOI:** 10.7498/aps.66.074202

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61475114, 61227011), and the National Instrument Program, China (Grant No. 2013YQ030915).

† Corresponding author. E-mail: [beiyangkl@tju.edu.cn](mailto:beiyangkl@tju.edu.cn)