

# 角度扫描型表面等离子体共振传感器抗噪声干扰的方法研究

齐攀<sup>1</sup> 马晓<sup>2,3</sup> 张子邦<sup>2,3</sup> 钟金钢<sup>2,3</sup> 李莹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>广东交通职业技术学院电子工程系, 广东 广州 510650

<sup>2</sup>暨南大学光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632

<sup>3</sup>暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632

**摘要** 表面等离子体共振(SPR)传感器已广泛应用于生物学、医学、化学、药物筛选以及环境监测、食品安全等领域。但SPR传感系统检测样品时易受到来自光源、光电检测器等器件自身噪声及环境光噪声的影响,其中环境光噪声的影响尤为明显,因此SPR传感器通常需要在遮光环境下进行操作,不利于现场的快速检测。为此,在自行研制的角度扫描型SPR传感器基础上,重点研究环境光噪声的特性,提出一种统计平均滤波和低通滤波结合的数据处理方法来抑制日光灯照环境下的噪声干扰。检测磷酸盐(PBS)缓冲液的实验结果表明,该方法可使SPR传感器在日光灯照环境下准确检测,相对遮光测量结果的误差为0.0027%。该方法可有效提高角度扫描型SPR传感器抗环境光干扰能力,具有良好的应用和推广价值。

**关键词** 表面光学; 表面等离子体共振; 传感器; 环境光噪声; 数据处理

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.052401

## Research on Anti-Noise-Interference Method of Angle Scanning Surface Plasmon Resonance Sensor

Qi Pan<sup>1</sup> Ma Xiao<sup>2,3</sup> Zhang Zibang<sup>2,3</sup> Zhong Jingang<sup>2,3</sup> Li Ying<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics Engineering, Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510650, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

<sup>3</sup>Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

**Abstract** The surface plasmon resonance (SPR) sensor is widely used in biology, medicine, chemistry, drug screening, environmental monitoring, and food safety. However, the SPR sensor system can be easily affected by device self noise of optical source and photoelectricity detector etc, and ambient lights noise during detections, where the ambient light noise is particularly obvious. So the operation of SPR sensor needs to be in a shading environment, which is not conducive for rapid detections. To solve this problem, the characteristics of ambient light noise are analyzed on the basis of self-developed angle scanning surface plasmon resonance sensor. A data processing method, which combines an arithmetic average filtering and a low-pass filtering, is innovatively put forward to suppress the noise under fluorescent lights illumination. The experimental results of phosphate buffered saline (PBS) buffer detection shows that the proposed method can offer accurate detection under fluorescent lights illumination. The error of measurement results is 0.0027%, relative to the results in a shading measurement. The proposed method can effectively enhance the anti interference ability to ambient light of the angle scanning SPR sensor. Moreover, it has good application and popularization value.

**Key words** optics at surfaces; surface plasmon resonance; sensor; ambient light noise; data processing

**OCIS codes** 240.6680; 120.4570; 280.1415

收稿日期: 2014-11-12; 收到修改稿日期: 2014-12-02; 网络出版日期: 2015-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(41206081)、海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室项目(MATHAB20120208)、广东省自然科学基金(2014A030310483)

作者简介: 齐攀(1982—),男,博士,讲师,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: qiqipan@163.com

## 1 引言

从20世纪80年代表面等离子体共振(SPR)技术用于传感器研究领域以来,SPR传感器逐渐成为传感器领域的研究热点<sup>[1-3]</sup>。由于SPR传感器具有灵敏度高、免标记、快速检测等特点<sup>[4-6]</sup>,目前已被广泛应用于生物学、医学、化学、药物筛选以及环境监测、食品安全等领域<sup>[7-8]</sup>。但任何传感检测系统在实际应用时都存在噪声干扰的问题,如不采取有效措施对其进行处理,则会影响系统稳定性和检测精度<sup>[9-10]</sup>。SPR传感系统也不例外,同样存在噪声干扰的问题<sup>[11]</sup>,分析其噪声来源,主要包括环境光噪声、光源噪声、光电检测器噪声、机械振动噪声,其中环境光噪声尤为明显。因此,在用SPR传感器进行检测时,通常需要对SPR传感器进行遮光处理,以避免环境光对其测量带来的影响。这给实验操作带来极大的不便,也对SPR传感器的应用场合提出了较高要求,使得目前SPR传感器的使用还主要停留在实验室阶段,难以应用于现场检测。

因此,针对自行研制的角度扫描型SPR传感器,在研究器件噪声和环境光噪声特性的基础上,提出一种主要用于抑制日光灯照环境下噪声对SPR检测影响的数据处理方法,并通过实验验证了该方法的可行性。将该方法应用于SPR传感器,有望实现将SPR传感器用于超市、集市、工厂等需要现场快速检测的场所。

## 2 角度扫描型SPR传感器的原理

基于麦克斯韦电磁波理论的SPR效应,是一种发生在电介质与金属薄层分界面上的物理光学现象<sup>[12-15]</sup>。SPR效应对附着在贵金属膜表面上的电介质的折射率变化极其敏感,可高精度探测电介质折射率的微小变化,从而使基于SPR效应的传感器不需要对样品进行传统的标记和纯化,就可快速、实时、原位、动态地分析生物分子的相互作用。SPR传感器按激励方式划分<sup>[1]</sup>,主要有:棱镜激励式、光纤激励式、光栅激励式等。基于Kretschmann模型的棱镜式SPR传感器的研究相对较为成熟。在棱镜式SPR传感器中,有共振角光信号和共振波长光信号两种光信号探测方式,但一般多采用装置相对简单、容易实现的共振角光信号探测方式。

棱镜耦合式角度扫描型SPR传感器原理如图1所示。P偏振光源进行角度扫描时,光电检测器(PD)实时探测出射光的光强,若待测样品上发生SPR效应,则出射光强呈现强弱变化,从而得到SPR曲线,SPR曲线中光强最低点所对应的角度值反映了待测介质的折射率信息<sup>[16]</sup>,若待测样品折射率增大,则SPR共振角也相应增加。

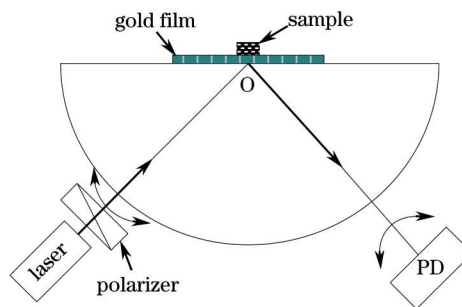


图1 棱镜耦合方式SPR原理示意图

Fig.1 Schematic of SPR prism-coupling mode

## 3 SPR传感器抑制环境光下噪声干扰的方法研究

### 3.1 噪声对SPR传感器的影响分析

将自行研制的角度扫描型SPR传感器置于日光灯照的室内环境中,用PD对SPR传感器的出射光进行连续探测,得到的光强信号如图2(a)所示。关闭日光灯,用遮光布将整个SPR传感系统进行遮光处理,用PD对SPR传感器的出射光进行连续探测,得到的光强信号如图2(b)所示。

由图2(a)可以看出,出射光周期变化(频率约为100 Hz),与日光灯管闪光频率相同,可见环境光对SPR检测会造成较大的噪声影响。如图2(b)所示,遮光测量时,出射光无明显周期变化,但可见到其他噪声信号存在。从测得的出射光信号中分别取50、100、200、500、1000、10000点,求其期望值分别为2.1145、2.1145、2.1147、2.1146、2.1146、2.1145,基本可判定该噪声信号为高斯白噪声,其主要来源包括激光器噪声、光电检测器噪声等热噪声信号。

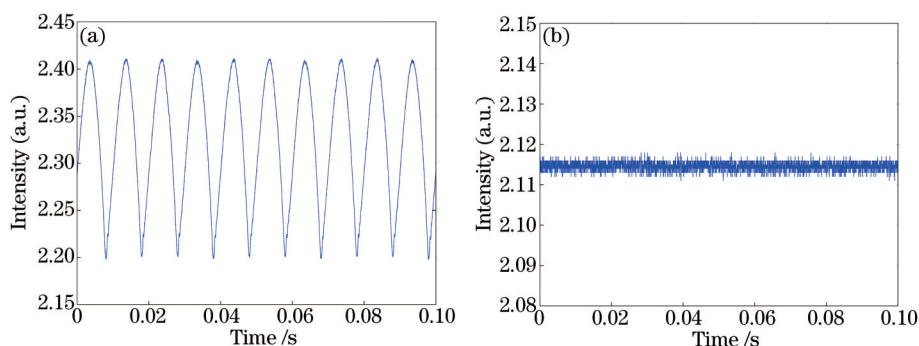


图2 (a) 不遮光时测量出射光的强度信号; (b) 遮光时测量出射光的强度信号

Fig.2 Signal of emitted light intensity detected (a) without shading; (b) with shading

在遮光和不遮光两种情况下对生物溶剂PBS缓冲液(2 mmol/L  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ , 2 mmol/L  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , 150 mmol/L  $\text{NaCl}$ , pH7.4)进行SPR检测,获得的SPR曲线如图3所示,可见环境光对SPR检测的影响十分明显。

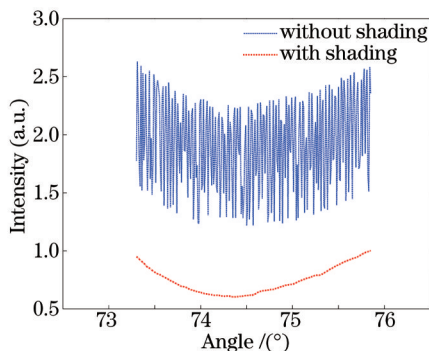


图3 遮光和不遮光时测量PBS的SPR曲线

Fig.3 SPR curves of PBS detected with and without shading

### 3.2 SPR传感器抑制环境光下噪声干扰的数据处理方法

确定了噪声的性质后,就可以用不同的方法处理噪声。对高斯白噪声而言,采用统计平均滤波即作为一种有效的方法。因为服从高斯分布的白噪声统计平均值为零或者常数,而统计平均滤波是对角度扫描中的每个测量点进行多次采样进行算术平均运算。统计平均滤波法的关键是确定采样次数,采样次数越多处理后的结果越平滑、效果越好。但采样次数越多,处理所需的时间越长,不利于实时检测。首先,在遮光情况下,单点采样次数分别设置为50、100、200、500、1000、10000,对PBS进行SPR检测(扫描范围 $3^\circ$ ,扫描步长 $0.01^\circ$ ),其中采样次数为200、1000、10000的SPR曲线如图4所示。

对上述不同采样次数下测得的SPR共振角进行分析发现,采样次数达200以上可有效滤除高斯白噪声的影响,设置采样次数为200、500、1000、10000,多次测量PBS缓冲液SPR共振角的偏差基本为零。

在不遮光检测的情况下,高斯白噪声和环境光噪声同时存在。首先通过统计平均滤波法对高斯白噪声

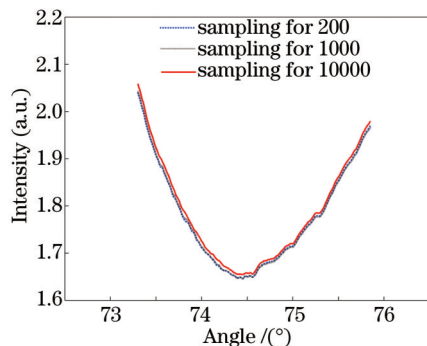


图4 遮光时设置不同采样次数测量PBS的SPR曲线  
Fig.4 SPR curves of PBS detected by setting different sampling times with shading

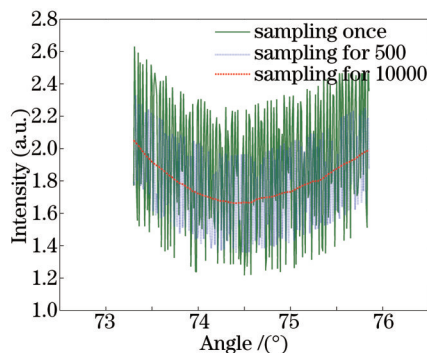


图5 不遮光时设置不同采样次数测量PBS的SPR曲线  
Fig.5 SPR curves of PBS detected by setting different sampling times without shading

进行处理,对PBS缓冲液进行SPR扫描检测(扫描范围 $3^\circ$ ,扫描步长 $0.01^\circ$ ),得到的SPR曲线如图5所示。对于周期分布的环境光噪声信号,很难保证采样次数是周期性噪声周期的整数倍,使其刚好被统计平均滤波去除。采样次数越多,噪声误差所占比例越小,即当单点采样次数较多时,统计平均滤波对环境光噪声有一定的抑制效果,但是单点采样次数过多会影响单次扫描时间,降低采集效率,不利于实现快速检测。以扫描范围 $3^\circ$ ,扫描步长 $0.01^\circ$ 为例进行说明:单点采样次数200完成单次扫描约需15.5 s,单点采样次数10000完成单次扫描约需43.8 s。

为了实现既准确又快速的SPR扫描检测,需要平衡采样次数和单次采样时间之间的关系。因此,首先选用一个适当的采样次数进行统计平均滤波,主要去除高斯白噪声;然后对所得信号进行低通滤波,在频域上滤除环境光噪声。自行研制的SPR传感系统角度扫描方式为:P偏振光入射到振镜,通过振镜旋转来改变反射光线的角度,从而实现角度扫描。振镜每旋转一个角度,则测量一次出射到光电检测器上的光强。整个SPR扫描曲线由等间隔的测量点组成,SPR传感系统中数据采集卡的采样频率为100 kHz,若每个测量点的单点采样次数小于1000(耗时0.01 s),则每个测量点在多次采样过程中受环境光的调制干扰不足一个周期(频率100 Hz,周期约0.01 s),导致采集到的环境光干扰频率发生变化,因此,整个扫描测量过程存在多个频率的干扰信号,这些干扰信号可用低通滤波的方法进行处理。

由于测量过程中还存在计算机处理速度、机械振动等许多不确定因素的影响,很难准确计算环境光的干扰频率,因此采取定标的方法来确定滤波截止频率。SPR系统不遮光,单点采样次数设置为200,扫描范围 $3^\circ$ ,扫描步长 $0.01^\circ$ ,对PBS缓冲液进行SPR扫描,SPR曲线的频谱如图6所示,在零级谱附近定标,通过多次实验比对,选取一个适合的截止频率,对SPR信号进行傅立叶变换,实现低通滤波。图7为不遮光单点采样次数200再低通滤波后得到的SPR曲线和遮光单点采样次数10000时测得的SPR曲线(为便于比对,将高度调为一致)。

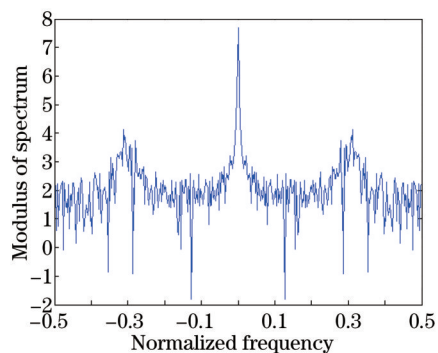


图6 SPR曲线的频谱图(对数坐标)

Fig.6 Spectrogram of SPR curve (on a logarithm scale)

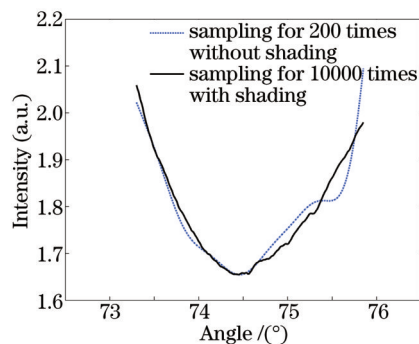


图7 遮光和不遮光时数据处理后的SPR曲线

Fig.7 SPR curves after the data processing with and without shading

由图7可见,不遮光时采用少量采样统计平均滤波结合低通滤波的方法处理后的SPR曲线和遮光时单点大量采样统计平均滤波测得的SPR曲线共振峰基本重合,多次测量其SPR共振角的偏差在 $0.002^\circ$ 以内(具体测量数据见表1),相对误差约为0.0027%。若减小扫描步长,偏差值会继续减少。并且,单点少量采样(200次)统计平均滤波结合低通滤波的方法,比单点大量采样(10000次)统计平均滤波的方法完成单次扫描所用时间缩短了约28 s。

表1 遮光和不遮光时PBS缓冲液共振角的测量数据

Table 1 Resonance angle measurement data of PBS with and without shading

Measurement times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average value
With shading /( $^\circ$ )	74.51	74.50	74.51	74.51	74.51	74.51	74.50	74.51	74.51	74.51	74.508
Without shading /( $^\circ$ )	74.50	74.50	74.51	74.50	74.51	74.51	74.51	74.51	74.50	74.51	74.506

## 4 结 论

在自行研制的角度扫描型SPR传感器基础上,研究噪声对SPR检测的影响,提出一种利用统计平均滤



波和低通滤波结合的方法抑制环境光下的噪声干扰。检测PBS缓冲液的实验结果表明,该方法可使SPR传感器在日光灯照环境下准确检测,与遮光检测的测量偏差在 $0.002^\circ$ 以内,相对误差约为0.0027%。该方法在角度扫描型SPR传感器中具有较好的应用价值,可有效抑制环境光干扰,有望实现将SPR传感器应用于现场快速检测。并且,该方法对成像型SPR传感器同样具有广泛的适用性。

### 参考文献

- 1 Schasfoort R B M, Tudos A J. Handbook of Surface Plasmon Resonance[M]. London: Royal Society of Chemistry, 2008.
- 2 Espiritu R A, Matsumori N, Murata M, *et al.*. Interaction between the marine sponge cyclic peptide theonellamide a and sterols in lipid bilayers as viewed by surface plasmon resonance and solid-state  $^2\text{H}$  nuclear magnetic resonance[J]. Biochemistry, 2013, 52(14): 2410-2418.
- 3 Chen Qianghua, Luo Huipu, Wang Sumei, *et al.*. Measurement of air refractive index based on surface plasmon resonance and phase detection by dual-frequency laser interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0108001.  
陈强华, 罗会甫, 王素梅, 等. 基于表面等离子体共振和双频激光干涉相位测量的空气折射率测量[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0108001.
- 4 Wang Jia, Zhou Jian. Status in quo of application and development trend of SPR biosensors[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(4): 1-4.  
王佳, 周健. SPR生物传感器的应用现状和发展趋势[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(4): 1-4.
- 5 Zhang Yingying. SPR technology in detecting the imaginary part of refractive index of absorptive medium[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 102802.  
张颖颖. SPR技术用于吸收介质的折射率虚部检测[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 102802.
- 6 Liu Chang, Zou Zhengfeng, Chen Shufen, *et al.*. Surface plasmon resonance sensor based on compact disk grating[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0314001.  
刘畅, 邹正峰, 陈淑芬, 等. 基于光盘光栅的表面等离子体共振传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0314001.
- 7 Wang Yijia, Zhang Chonglei, Wang Rong, *et al.*. Extracting phase information of surface plasmon resonance imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0524001.  
王弋嘉, 张崇磊, 王蓉, 等. 表面等离子体共振成像系统相位提取[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0524001.
- 8 Wang Kangni, Zheng Jihong, Gui Kun, *et al.*. Surface plasmon resonance of holographic polymer dispersed liquid crystal grating doped with nano-Ag[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 021603.  
王康妮, 郑继红, 桂坤, 等. 纳米银掺杂的液晶/聚合物全息光栅中的表面等离子体共振[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 021603.
- 9 Skidmore G L, Horstmann B J, Chase H A. Modelling single-component protein adsorption to the cation exchanger S Sepharose® FF[J]. Journal of Chromatography A, 1990, 498: 113-128.
- 10 Li Weixiang, Ma Xiaohong, Lü Hui, *et al.*. Enhanced measurement precision of angular surface plasmon resonance sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(2): 342-346.  
李玮翔, 马晓红, 吕晖, 等. 角度型表面等离子体振荡传感器测量精度提高的新方法[J]. 应用光学, 2012, 33(2): 342-346.
- 11 Zhao Yuanyuan, Xiao Long, Zhu Ying, *et al.*. Data analyses of a non-scanning optical biosensor based on surface plasmon resonance[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2011, 45(3): 323-327.  
赵媛媛, 肖龙, 朱莺, 等. 非扫描式光学SPR生物传感器的数据分析[J]. 河南农业大学学报, 2011, 45(3): 323-327.
- 12 Homola J, Lu H B, Yee S S. Dual-channel surface plasmon resonance sensor with spectral discrimination of sensing channels using dielectric overlayer[J]. Electronics Letters, 1999, 35(13): 1105-1106.
- 13 Nelson B P, Grimsrud T E, Liles M R, *et al.*. Surface plasmon resonance imaging measurements of DNA and RNA hybridization adsorption onto DNA microarrays[J]. Analytical Chemistry, 2001, 73(1): 1-7.
- 14 Yuk J S, Kim H S, Jung J W, *et al.*. Analysis of protein interactions on protein arrays by a novel spectral surface plasmon resonance imaging[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2006, 21(8): 1521-1528.
- 15 Homola J, Yee S S, Ganglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1999, 54(1): 3-15.
- 16 Qi Pan, Li Ying, Feng Mingchuang, *et al.*. Scanning surface plasmon resonance biosensor for array samples detection[J]. Optical and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2363-2372.  
齐攀, 李莹, 冯明创, 等. 用于阵列样品检测的扫描式表面等离子体共振生物传感器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2363-2372.

栏目编辑: 张雁