

引用格式: LI Hui, XUE Qingsheng, BAI Haoxuan, et al. Polarization Spectrum Measurement Technology Based on Intensity Modulation[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(4):0430001

李辉,薛庆生,白皓轩,等. 基于强度调制的偏振光谱测量技术[J]. 光子学报, 2023, 52(4):0430001

基于强度调制的偏振光谱测量技术

李辉,薛庆生,白皓轩,李子健

(中国海洋大学 信息科学与工程学部 物理与光电工程学院,青岛 266100)

摘 要:针对现阶段强度调制偏振光谱测量技术在光程差域内不同通道间存在频谱信息串扰的不足,采用加窗插值傅里叶变换法,研究了不同切趾函数对强度调制偏振光谱测量技术的影响。首先,进行强度调制偏振光谱测量技术理论分析,完成强度调制模块的设计;其次,根据强度调制模块的设计指标,模拟入射光的光强信息及采用不同切趾函数的信息解调复原过程;最终,对强度调制偏振光谱测量系统进行仿真,根据仿真模型结合高分辨率光谱仪、平行光管等器件完成偏振光谱测量装置的搭建,进行偏振光谱测量实验。研究结果表明,偏振光谱测量系统设计指标选择合适的切趾函数可以减少光强信息截断过程中造成的频谱能量泄露,使光程差域内不同通道之间的串扰信息减少、偏振光谱复原精度提高,不同切趾函数切趾处理后线偏振光的偏振度最小误差由 0.076 8 减小到 0.001 4,偏振度接近 1。

关键词:偏振光谱测量技术;高分辨率光谱仪;切趾函数;加窗插值傅里叶变换算法;频谱能量泄露

中图分类号:O433.4;X853

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235204.0430001

0 引言

光经过介质完成反射、折射、散射等传输过程中,可以产生与介质属性相关的偏振信息。根据此原理,可以通过收集不同偏振信息,实现对不同目标物体的探测。因此,偏振信息被广泛用于大气气溶胶研究、目标物检测、土壤湿度反演等多个领域^[1-3]。为了表征光的偏振信息,研究人员提出了多种表示方法,其中包括斯托克斯矢量表示法、邦加球表示法、相干矩阵表示法及琼斯矢量表示法,本文采用的强度调制偏振光谱测量技术是一种斯托克斯光谱信息测量技术。

强度调制偏振光谱测量技术作为测量偏振信息的常用方法之一,由日本学者 OKA K 等^[4]首次提出,克服了传统测量方法实时性不高、时间分辨率低等缺点,实现了对目标光的静态、快照式斯托克斯光谱信息的测量,使强度调制偏振光谱测量技术成为热点研究课题。随着偏振信息测量技术的深入研究, JONES S H 等设计了偏振光谱强度调制技术与棱镜色散光谱成像仪相结合的光学系统,该系统属于快照式光谱偏振成像系统^[5]; HAGEN N 分析了强度调制偏振光谱测量技术中不同类型偏振器对系统性能的影响,为强度调制模块的设计提供理论指导^[6]。对于强度调制偏振光谱测量技术的研究,国内虽然开始时间较晚,但近几年也取得了显著的科研成果。安徽大学宋志平团队对强度调制偏振光谱仪的系统设计做了大量研究,介绍了强度调制偏振光谱仪的结构原理,分析了调制器设计、光谱仪选型与系统指标间的匹配关系,进一步验证 PSIM 系统设计的正确性^[7]。长春光机所颜昌翔团队围绕强度调制型偏振光谱成像系统进行了一系列的误差分析与定标研究^[8]。西安交通大学张淳民团队对通道型偏振干涉成像光谱仪开展了大量研究,丰富了偏振光谱的测量方法^[9-11]。目前,基于强度调制的偏振光谱测量技术由于光谱仪的光谱分辨率与偏振模块的参数设计关系,导致偏振光谱测量的有效工作范围减小且存在频谱信息串扰现象。因此,本文采用高分辨

基金项目:中国科学院海洋大科学研究中心重点部署项目(No. COMS2019J04),国家自然科学基金(Nos. U2006209, 41575023),山东省重点研发计划(No. 2020CXGC010706),中国工程院咨询研究项目(No. 2020-XZ-5-03),人才计划项目(No. 202112003),泰山学者科研经费(No. 202105033008)

第一作者:李辉, 2514051653@qq.com

通讯作者:薛庆生, xueqingsheng@ouc.edu.cn

收稿日期:2022-11-01; **录用日期:**2022-12-26

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

率光谱仪实现高精度、宽波段探测需求,通过模拟仿真实验,介绍不同切趾函数对强度调制偏振光谱测量技术的影响。

1 测量原理及参数设计

1.1 强度调制偏振光谱测量原理

根据强度调制偏振光谱测量原理,通过ZEMAX软件对强度调制偏振光谱测量系统进行仿真,结果如图1所示。

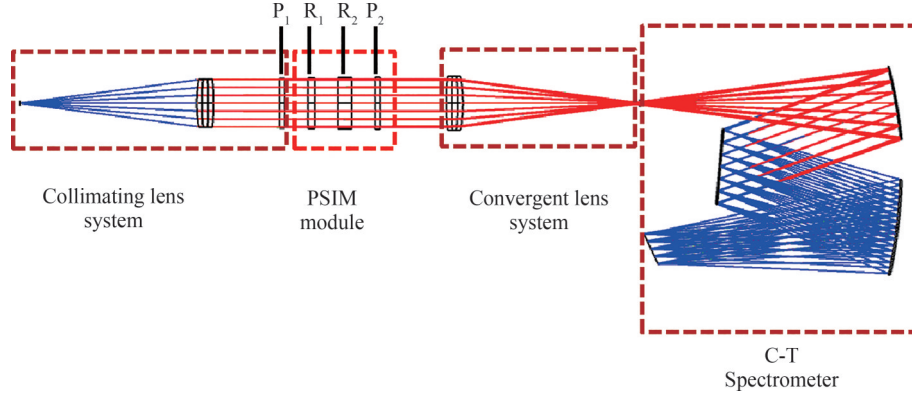


图1 强度调制型偏振光谱测量系统

Fig.1 System of spectrum-modulated polarization detection

根据图1仿真结果,强度调制偏振光谱测量系统包括准直镜组、强度调制模块、会聚镜组、光谱仪四部分,其中准直镜组将待测光源产生的入射光进行准直,经过检偏器 P_1 使入射光平行入射强度调制模块;强度调制模块主要由材质为石英晶体的延迟器 R_1 、 R_2 以及检偏器 P_2 组成,延迟器 R_1 、 R_2 的快轴之间夹角为 45° ,延迟器 R_1 与检偏器 P_2 快轴方向平行;通过准直镜组中检偏器 P_1 产生待测线偏振光,产生的线偏振光经过延迟器 R_1 、 R_2 及检偏器 P_2 完成光信号的调制与叠加;最终,通过会聚镜组,使调制光信号进入光谱仪输出含有偏振信息的功率谱。由强度调制偏振光谱测量原理知光谱仪探测器仅响应光场的总强度^[8],所以出射光的强度调制光谱表达式为

$$I(\sigma) = \frac{1}{2} S_0(\sigma) + \frac{1}{2} S_1(\sigma) \cos(2\pi L_2 \sigma) + \frac{1}{4} |S_{23}(\sigma)| \cos\{2\pi(L_2 - L_1)\sigma + \varphi_2(\sigma) - \varphi_1(\sigma) + \arg[S_{23}(\sigma)]\} - \frac{1}{4} |S_{23}(\sigma)| \cos\{2\pi(L_2 + L_1)\sigma + \varphi_2(\sigma) + \varphi_1(\sigma) - \arg[S_{23}(\sigma)]\} \quad (1)$$

式中, \arg 表示取幅角运算,其中 $S_{23}(\sigma) = S_2(\sigma) + iS_3(\sigma)$ 。根据式(1)可知, $\varphi_1(\sigma)$ 、 $\varphi_2(\sigma)$ 表示相位延迟量中的非线性项通常远小于线性项,所以可以忽略;光谱仪获取的强度光谱信息为全部斯托克斯矢量的叠加结果,光谱信息的不同斯托克斯参量被调制到不同载波频率上,其中 $S_1(\sigma)$ 分量由频率为 L_2 余弦信号进行调制, $S_{23}(\sigma)$ 被频率为 $L_2 - L_1$ 与 $L_2 + L_1$ 两种不同频率的余弦信号进行调制,余弦信号的频率 L_i ($i=1, 2$) = $\Delta n D_i$, Δn 为延迟器晶体的折射率, D_i 为延迟器的厚度,表示o光与e光在延迟器晶体中产生的光程差,是设计强度调制模块的重要设计指标。根据强度调制光谱的表达式(1),待测目标的偏振光谱信息无法直接进行复原工作,需要进行傅里叶逆变换计算其自相关函数,转化为光程差域不同通道的表达式^[8]

$$A(h) = A_0(h) + A_1[h - (L_2 - L_1)] + A_1^*[-h - (L_2 - L_1)] + A_2[h - L_2] + A_2^*[-h - L_2] + A_3[h - (L_2 + L_1)] + A_3^*[-h - (L_2 + L_1)] \quad (2)$$

式中, h 表示光程差域内的自变量,上标*表示取复共轭处理,根据式(2)对光程差域内不同通道进行矩形滤波处理得到不同通道表达式为^[8]

$$\begin{cases} A_0(h) = F^{-1}\left\{\frac{1}{2}S_0(\sigma)\right\} \\ A_1[h-(L_2-L_1)] = F^{-1}\left\{\frac{1}{8}S_{23}^*(\sigma)\exp[-i2\pi(L_2-L_1)\sigma]\right\} \\ A_2[h-L_2] = F^{-1}\left\{\frac{1}{4}S_1(\sigma)\exp(-i2\pi L_2\sigma)\right\} \\ A_3[h-(L_2+L_1)] = F^{-1}\left\{-\frac{1}{8}S_{23}(\sigma)\exp[-i2\pi(L_2+L_1)\sigma]\right\} \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)显示,矩形滤波三个通道,进行傅里叶变换即可复原全部斯托克斯,结果为^[8]

$$\begin{cases} F\{A_0(h)\} = \frac{1}{2}S_0(\sigma) \\ F\{A_1[h-(L_2-L_1)]\} = \frac{1}{8}S_{23}^*(\sigma)\exp\{-i2\pi(L_2-L_1)\sigma\} \\ F\{A_2[h-L_2]\} = \frac{1}{4}S_1(\sigma)\exp(-i2\pi L_2\sigma) \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)知,根据强度调制模块的参数计算相位延迟量 $\varphi_1(\sigma)$ 、 $\varphi_2(\sigma)$ 的具体值,通过实部运算或虚部运算可以复原出全部的斯托克斯参量;但实际实验过程中,由于延迟器设计误差及实验误差,相位延迟量不再是理论计算值 $\varphi_1(\sigma)$ 、 $\varphi_2(\sigma)$,需要选择参考光重新标定延迟器的相位延迟量,其中常用的标定方法为22.5°线偏振参考光标定法^[12],其中22.5°线偏振光的斯托克斯参量满足条件

$$\begin{cases} S_0^{22.5}(\sigma) = \sqrt{2}S_1^{22.5}(\sigma) = \sqrt{2}S_2^{22.5}(\sigma) \\ S_3^{22.5}(\sigma) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

计算得到的解调系数为

$$\begin{cases} C_{S_0} = \frac{2M_{S_0}}{S_0(\sigma)} \\ C_{S_1} = \frac{2\sqrt{2}M_{S_1}}{S_0(\sigma)} \\ C_{S_2} = \frac{2\sqrt{2}M_{S_2}}{S_0(\sigma)} \end{cases} \quad (6)$$

式中, M_{S_0} 、 M_{S_1} 、 M_{S_2} 表示22.5°线偏振光被载波信号调制后的斯托克斯矢量谱, $S_0 = 2I_0$,其中 I_0 表示未经调制的参考光强度谱。

1.2 切趾函数

由于强度调制偏振光谱测量装置中光谱仪的工作波段是有限的,所以,光谱仪只能在有限范围内进行采样与傅里叶变换,即对无限长的偏振光谱信息采用矩形窗切趾函数进行截断,截断过程为

$$I(n)_D = I(n) \times \text{rect}(n) \quad (7)$$

式中, $I(n)_D$ 为截取信号, $I(n)$ 为无限长理想信号, $\text{rect}(n)$ 为矩形窗切趾函数。由于截取的光谱信号中原始信号频率与采样频率不同步,在进行傅里叶变换的过程中将引入频谱能量泄露^[13],若该误差未得到有效解决,将会使计算值与理论值出现较大误差,光程差域内出现不同通道之间的频谱信息串扰现象,使测量精度降低。为减少误差,在傅里叶变换时对时域信号乘以适合的切趾函数,通过切趾函数幅度逐渐减小进而减小数据截断带来的频谱泄露,其中常用的切趾函数有汉宁窗、布莱克曼窗、三角窗、凯赛窗等。同时,由于普通光谱仪无法实现等波数采样,进行快速傅里叶变换解调处理,因此,需要进行插值处理将光强信息进行离散均匀采样即

$$I(n)_D = \text{Interp}[I(n) \times \text{rect}(n)] \quad (8)$$

1.3 偏振模块参数设计

强度调制模块中延迟器厚度 D 是根据光谱仪的硬件参数进行设计的,本文采用型号为iHR550光谱仪,

延迟器的工作波段范围为 500 nm~800 nm,即光谱范围 $\Delta\lambda = 300$ nm(波数范围 $\Delta\sigma = 7\,500$ cm^{-1}),每个斯托克斯参量元素均有 21 个有效采样点($N=21$);强度调制模块中延迟器的制作材料选用折射率 $\Delta n \approx 0.009\,6$ 且表面平整度优于 $1/4\lambda$ ($\lambda=0.633$ μm),两面镀有增透膜的石英晶体。根据强度调制原理知,不仅要求斯托克斯矢量元素谱的复原分辨率不大于偏振光谱分辨率,且光谱仪的带宽 L 至少为各通道带宽 L 的 7 倍($\delta\lambda$ 为光谱分辨率),才能满足正常工作需求^[14],所以延迟器 1 厚度 D_1 满足

$$\frac{N}{\Delta n \times \Delta\sigma} \leq D_1 \leq \frac{\lambda^2}{7 \times \Delta n \times \delta\lambda} \quad (9)$$

根据式(9),考虑到偏振光谱分辨率,延迟器 R_1 的厚度设计需要留由一定余量,因此延迟器 R_1 的厚度 $D_1 = 3$ mm,根据 7 通道延迟器厚度设计关系^[8]延迟器 R_2 的厚度为延迟器 R_1 厚度的 2 倍,故延迟器 R_2 的厚度为 6 mm,两个延迟器的直径为 50 mm,线偏振片 P_1 、 P_2 消光比优于 10 000:1。

2 仿真分析

为研究不同切趾函数对强度调制偏振光谱测量技术的影响,根据 1.3 章节中延迟器 R_1 、 R_2 厚度分别为 3 mm、6 mm 以及厚度为 2.1 mm 的线偏振片 P_1 、 P_2 的设计指标,通过 MATLAB 软件模拟偏振光谱测量实验。首先,仿真过程中需要将强度调制光谱从波长域转化为波数域,但不能直接按照倒数关系进行转换,需要考虑转化过程中每个波段内能量守恒,能量守恒计算公式为^[15]

$$\int I(\lambda) d\lambda = \int I(\sigma) d\left(\frac{1}{\sigma}\right) = \int I(\sigma) \frac{-1}{\sigma^2} d\sigma \quad (10)$$

式中, $\frac{1}{\sigma^2}$ 为能量转换系数,根据式(1)、(8)、(10)结合三次样条插值算法,实现波长域与波数域的转换,并对线偏振光的调制光谱进行仿真,仿真结果如图 2 所示。

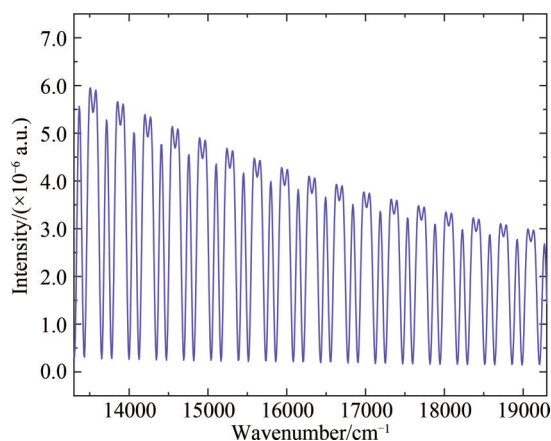


图 2 调制光谱

Fig. 2 The modulated spectrum

根据式(3)与(8),对仿真的调制光谱进行傅里叶逆变换与切趾函数相乘,得到不同切趾函数条件下光程差域的强度分布,如图 3 所示。

图 3 光程差域仿真结果显示,通道 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 的中心光程差分别近似为 $h=0$ μm 、28.8 μm 、57.6 μm 、86.4 μm ,不同切趾函数对频谱泄露的抑制效果不同,矩形窗切趾函数与参数 $\beta=0$ 的凯塞窗切趾函数泄露最严重,切趾效果相同;Hanning 窗切趾函数、Triang 窗切趾函数、Blackman 窗切趾函数、参数 $\beta=4$ 的凯塞窗切趾函数均对光程差域内不同通道频谱泄露有一定的改善效果,其中 Blackman 窗切趾函数效果最明显。

根据式(3),对光程域内 A_0 、 A_1 、 A_2 三个通道进行滤波,滤出式(3)中前三项并根据式(3)、(4)进行快速傅里叶变换与切趾函数去除,解调出模拟线偏振光的四个斯托克斯矢量,由于傅里叶变换过程中边界效应导致复原结果两边发生畸变,将其舍弃完成偏振光谱信息解调工作,其中解调结果如图 4 所示。

图 4 复原结果表明,采用矩形窗切趾函数与参数 $\beta=0$ 的凯塞窗切趾函数,斯托克斯矢量还原精度低于其他切趾函数;主要原因是两切趾函数的旁瓣衰减小于其他切趾函数,导致光程差域内频谱混叠较严重。

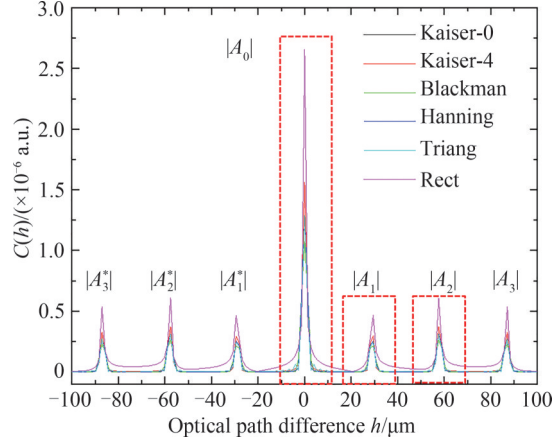


图3 光程差域调制光谱

Fig. 3 The modulated spectrum in the optical path difference domain

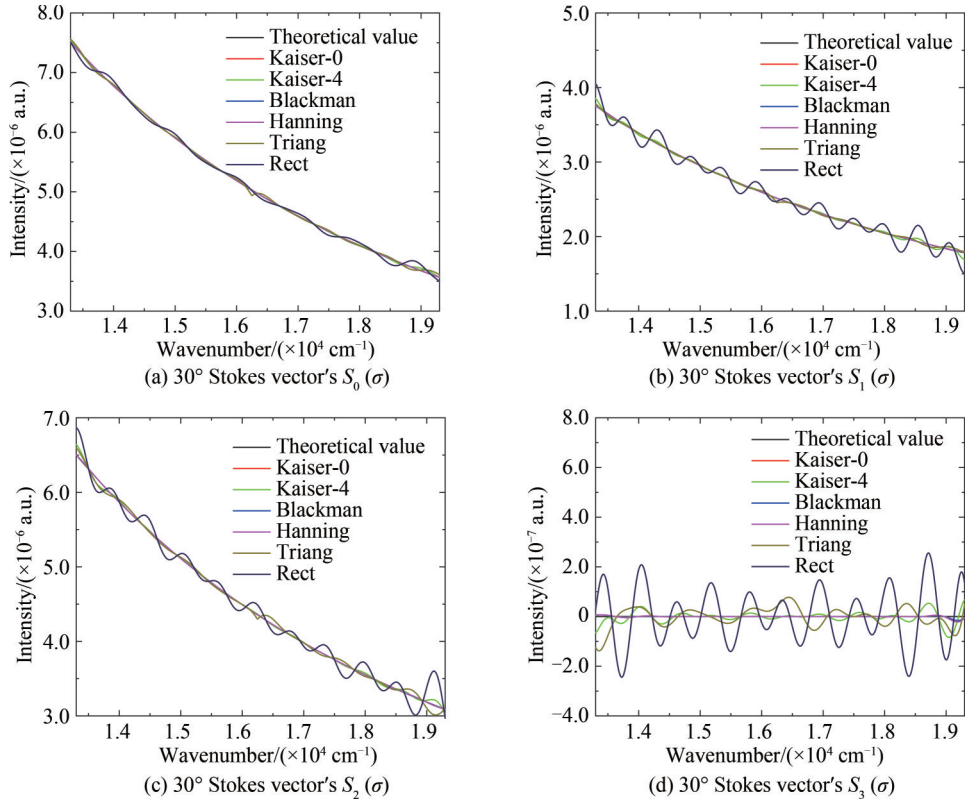


图4 30°线偏振光的4个Stokes矢量

Fig. 4 Four Stokes vectors of 30° linear polarized light

$$P(\sigma) = \frac{\sqrt{S_1(\sigma)^2 + S_2(\sigma)^2 + S_3(\sigma)^2}}{S_0(\sigma)} \quad (11)$$

根据斯托克斯还原结果,将不同切趾函数限制条件下的 $S_0(\sigma)$ 、 $S_1(\sigma)$ 、 $S_2(\sigma)$ 、 $S_3(\sigma)$ 四个斯托克斯矢量进行归一化处理与理论结果进行比较,并根据偏振度谱计算式(11)^[7],得到模拟偏振度谱曲线,结果如图5所示。

根据图5(a)、(b)复原结果,在不同切趾函数的作用下,目标光的Stokes参量接近理论值,30°线偏振光的偏振度接近1,并存在不同程度的“振铃”效应。为进一步评价不同切趾函数对“振铃”效应的影响,在有效测量范围内,计算切趾函数的相对旁瓣衰减大小,将调制后的待测光偏振度谱与理论值进行差值处理计算相对误差,计算结果如表1所示。

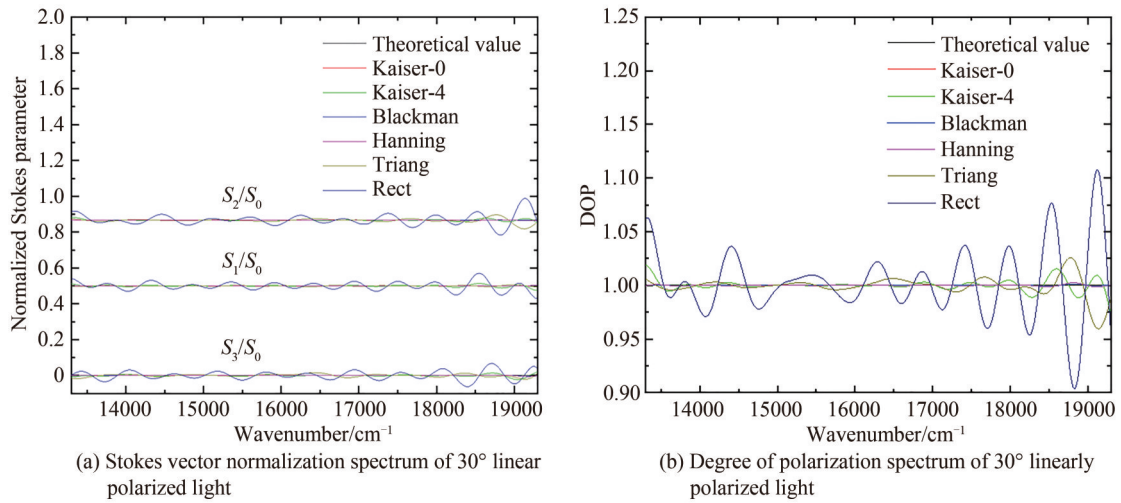


图5 目标光的Stokes参量归一化复原结果对比

Fig. 5 Comparison of normalized Stokes parameters reconstruction results of the target light

表1 不同切趾函数解调方法的复原误差对比

Table 1 Comparison of restoration errors of different apodization functions

| Apodization function | Relative sidelobe Attenuation/dB | Maximum error value | Minimum error value |
|----------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Rectangle | -13.3 | 9.63×10^{-2} | 7.68×10^{-2} |
| Hanning | -31.5 | 2.4×10^{-3} | 2.1×10^{-3} |
| Kaiser-4 | -30 | 1.91×10^{-2} | 1.12×10^{-2} |
| Kaiser-0 | -13.3 | 9.63×10^{-2} | 7.68×10^{-2} |
| Blackman | -58.1 | 2×10^{-3} | 1.4×10^{-3} |
| Triang | -26.5 | 2.59×10^{-2} | 7.9×10^{-3} |

根据上述仿真结果,不同切趾函数通过减小通道间频谱信息串扰进而达到抑制偏振度谱的“振铃”效应的效果,矩形窗切趾函数频谱泄露较严重,振铃效应较明显,布莱克曼窗切趾函数对“振铃”效应的抑制效果较明显,根据表1显示,相对于矩形窗切趾函数最小复原误差0.076 8,布莱克曼窗切趾函数的最小复原误差减小为0.001 4,偏振度更接近理论值1。因此,可以根据光程差域内相邻通道间的光程差大小,在最大化保留还原光谱细节的基础上,选用旁瓣衰减较大的切趾函数,减少通道间的频谱信息串扰。

3 实验验证

根据偏振光谱测量原理与仿真分析,在实验室条件下完成了实验装置搭建工作,如图6所示。在实验过

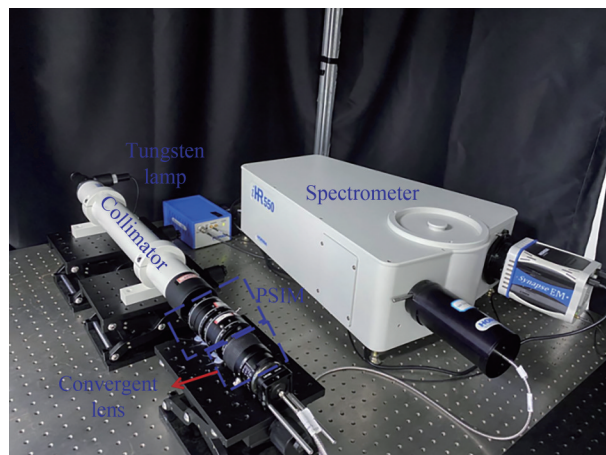


图6 实验装置

Fig. 6 The experimental devices

程中,根据ZEMAX仿真结果完成强度调制模块的装调工作,根据探测需求,转动检偏器 P_1 获取所需实验数据,进行光谱解调工作。

根据实验解调原理,通过实验装置采集未调制的 22.5° 线偏振光与调制的 22.5° 线偏振光的光强信号,求解解调系数并进行傅里叶解调工作,解调系数如图7所示。

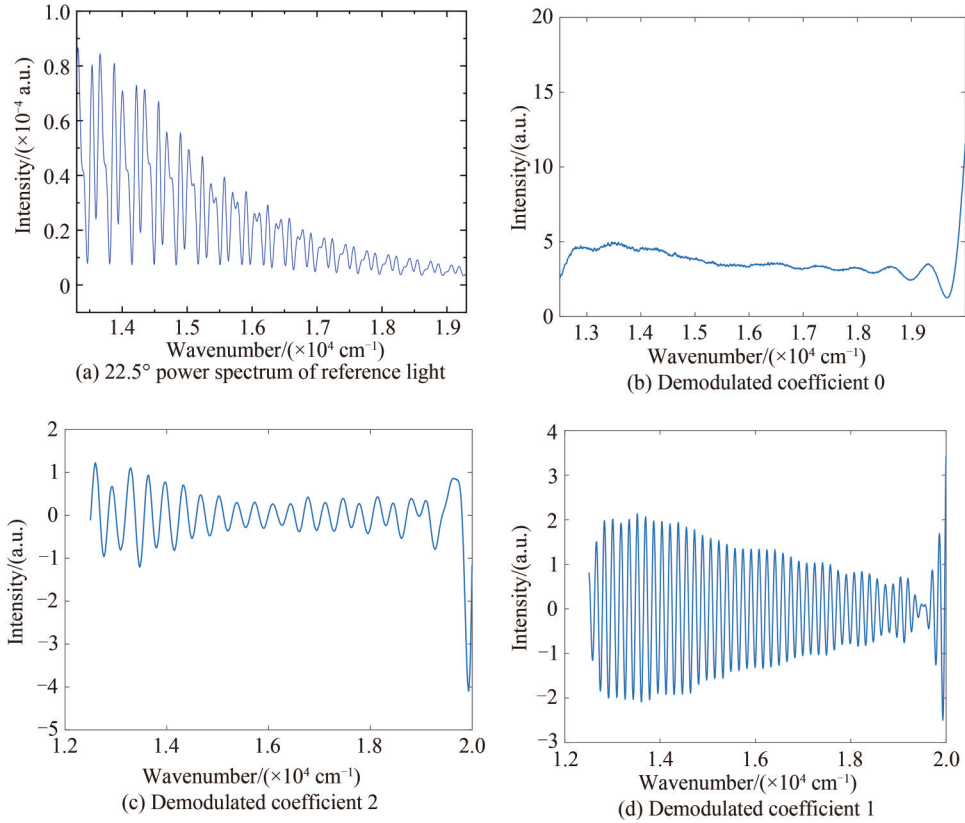


图7 解调系数测量结果

Fig. 7 Measured results of demodulation coefficients

结果显示,解调系数0接近常数,解调系数1频率为解调系数2频率的2倍,与理论值分析相符合。完成系数解调工作后,将待测光谱进行傅里叶逆变换,光程差域通道分布情况如图8所示。不同切趾函数对不同通道之间的抑制效果与仿真结果一致,进一步验证切趾函数抑制通道之间频谱信息串扰现象的有效性与可行性。

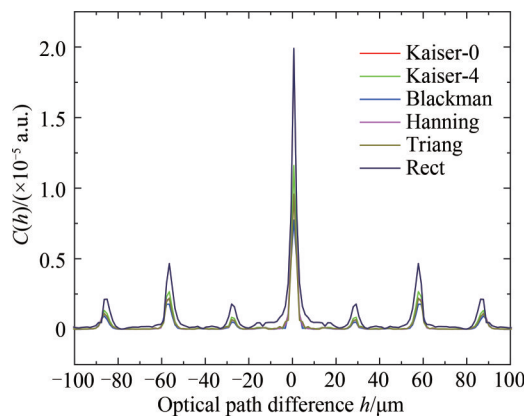


图8 实验测得的光程差域的强度分布

Fig. 8 The intensity distribution map of the optical path difference field measured by experiments

根据解调系数、切趾函数及矩形滤波,对光谱仪采集的待测光进行偏振光谱复原,将未进行调制的 22.5° 偏振光作为参考光与待测光斯托克复原参量进行对比,分析光谱还原精度,结果如图9所示。

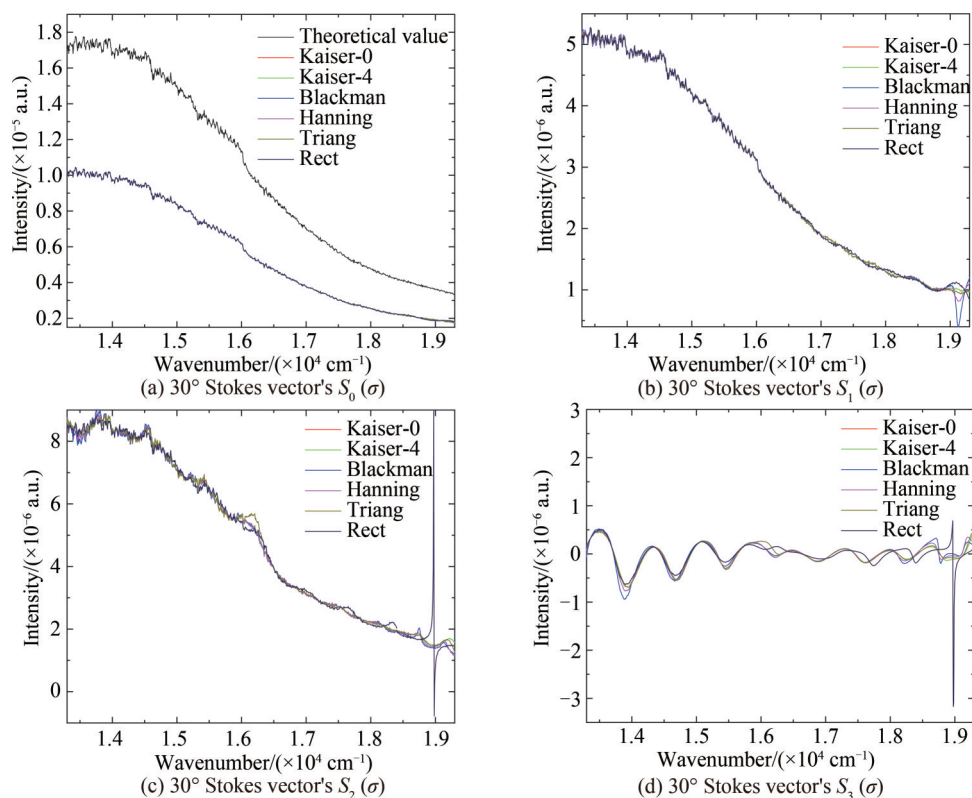


图9 不同光谱仪目标斯托克斯参量复原结果

Fig. 9 Result of stokes parameter recovery for different spectrometers

根据图9复原结果,采用不同切趾函数有效的抑制了偏振光谱不同通道之间的频谱信息串扰,根据还原结果计算不同切趾函数条件下的四个斯托克斯矢量归一化数值及偏振度值,并与理论数值进行比较,结果如图10所示。

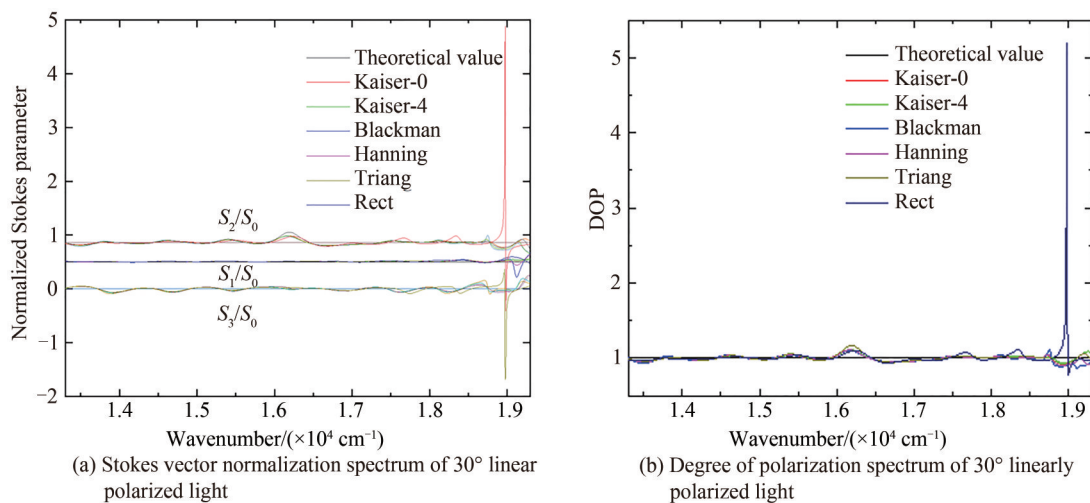


图10 实验条件下30°的Stokes参量归一化复原结果对比

Fig. 10 Comparison of normalized restoration results of stokes parameters at 30 degrees under experimental conditions

根据上述复原结果与表1不同切趾函数的旁瓣衰减大小,解调后线偏振光的偏振度接近1,归一化结果与理论分析结果吻合,光程差域内不同通道之间的频谱信息串扰,可以采用切趾函数进行抑制,抑制效果与切趾函数的旁瓣衰减大小有关,随着切趾函数旁瓣衰减的不断增大,对通道间的频谱信息串扰抑制效果越明显,因此,根据实际测量装置选择合适的切趾函数可以实现低串扰、高还原效果,有效抑制复原光谱的“振铃”效应,提高偏振光谱测量精度。

4 结论

光程差域内的频谱信息串扰作为强度调制偏振光谱复原过程中常见的误差,本文通过模型仿真与实验验证对比分析了常用切趾函数的性能,通过研究不同切趾函数对光程差域内不同通道间的频谱泄露的影响,分析得出:相同实验条件下,切趾函数的旁瓣衰减对偏振光谱测量过程中的频谱泄露有抑制作用;采用合适的切趾函数可以有效的减少偏振光谱的测量误差,提高系统的信噪比、减少“振铃”效应。

参考文献

- [1] ZHANG Ying, YU Yanqiang, ZHAO Huijie, et al. Retrieval method of soil moisture based on polarized information[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0117001.
张颖, 余焱强, 赵慧洁, 等. 基于偏振信息反演土壤湿度的方法[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0117001.
- [2] DAI Hu, YAN Changxiang, WU Congjun. Azimuth optimization of polarizers for the aerosol polarimeter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1243-1248.
代虎, 颜昌翔, 吴从均. 气溶胶偏振探测仪检偏器方位角优化[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1243-1248.
- [3] GUAN Jing, ZHAO Yong, ZHENG Yongqiu, et al. Optical polarization imaging for underwater target detection with non-scatter background[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2020, 11(4): 335-342.
- [4] OKA K, KATO T. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(21): 1475-1477.
- [5] JONES S H, ANNARILLI F J, KEBABIAN P L. Realization of quantitative-grade fieldable snapshot imaging spectropolarimeter [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6559-6573.
- [6] HAGEN N. Design of channeled spectropolarimeters[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(12): 3381-3389.
- [7] SONG Zhiping, HONG Jin, QIAO Yanli. System design of intensity modulation spectropolarimeter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(11): 2325-2331.
宋志平, 洪津, 乔延利. 强度调制偏振光谱仪的系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2325-2331.
- [8] 杨斌. 强度调制型偏振光谱成像系统测量误差及定标研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2018.
- [9] QUAN N, ZHANG C, MU T, et al. Channeled polarimetric technique for the measurement of spectral dependence of linearly Stokes parameters[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 90: 95-100.
- [10] ZHANG C, LI Q, YAN T, et al. High throughput static channeled interference imaging spectropolarimeter based on a Savart polariscope[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23314-23332.
- [11] SONG Zhiping, HONG Jin, QIAO Yanli. Method acquiring the demodulation coefficients of intensity-modulated spectropolarimeter by measuring reference light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412003.
宋志平, 洪津, 乔延利. 强度调制偏振光谱仪解调系数参考光测量方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412003.
- [12] DENG Jinglan, TONG Jingjing, GAO Minguang, et al. Improved triangular window apodization function based on zero-order Bessel function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0307001.
邓竞蓝, 童晶晶, 高闽光, 等. 基于零阶贝塞尔函数加权的三角窗切趾函数[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0307001.
- [13] HE Lingsong, XIONG Ying. Correction for the amplitude error in FFT by two window functions [J]. *Shock and Vibration*, 2001, (2): 51-53+60+95.
何岭松, 熊鹰. 用双窗法减小FFT谱分析估算误差[J]. *振动与冲击*, 2001, (2): 51-53+60+95.
- [14] 胡劲松. 集成PSIM偏振光谱仪系统设计[D]. 合肥: 安徽大学, 2019.
- [15] HAGEN N A, LOCKE A M, SABATKE D S, et al. Methods and applications of snapshot spectropolarimetry [C]. *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VI*, International Society for Optical Engineering, 2004, 5432: 167-174.

Polarization Spectrum Measurement Technology Based on Intensity Modulation

LI Hui, XUE Qingsheng, BAI Haoxuan, LI Zijian

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Department of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: As one of the common methods to measure polarization information, intensity modulated polarization spectrum measurement technology has the advantages of high real-time performance and high time resolution, and is widely used in many fields. In this method, the stokes vector of the target light is

modulated to the carrier signal of different frequencies by the intensity modulation module, and the spectral information of each element is modulated to the channel of different frequencies by the Fourier transform, finally, the polarization spectrum is obtained. Although the technique of intensity modulated polarization spectroscopy is simple and effective, there are still spectral overlap to varying degrees, which makes the Stokes parameters between channels interfere with each other and affects the accuracy of spectral reduction. At the same time, to meet the requirements of wide-band detection, on the basis of a certain spectral resolution of the spectrometer, the thickness of the intensity modulation module delay is rationally designed to reduce the interval between channels in the optical path difference domain, so as to achieve the purpose of wide-band operation range. Secondly, by increasing the thickness of the delay, the modulation information generated by the polarization module is collected with a high-resolution spectrometer to achieve a wide-band detection range. Based on using high resolution spectrometer to realize the requirement of wide band detection, aiming at the shortage of overlapping between different channels in the optical path difference domain of the current intensity modulated polarization spectrum measurement technology, the generation of aliasing error in optical path difference domain is analyzed. The influence of different toe-cutting functions on the measurement error of intensity-modulated polarization spectrum is studied by using windowed interpolation FFT transformation. Firstly, the theoretical analysis of intensity modulation polarization spectral measurement technology is carried out to analyze the relationship between the design of the retarder thickness in the polarization module and the spectral resolution of the spectrometer. And the design relationship between the two delayers is introduced to complete the design of the intensity modulation module. Secondly, according to the design index of the intensity modulation module, the process of demodulating and recovering the intensity information of the incoming light and the information using different toe-cutting functions is simulated. The distribution of different channels in the optical path difference domain is analyzed under different toe-cutting functions. The polarization spectrum information of different channels is restored, the four Stokes vectors are normalized, and the calculation of polarization degree and error analysis are completed. Finally, the intensity modulated polarization spectrum measurement system is simulated by ZEMAX software, and the polarization module is adjusted and installed according to the simulation model. At the same time, the polarization spectrum measurement device is built with high resolution spectrometer, parallel light tube and other devices, and the polarization spectrum measurement experiment is carried out. During the experiment, before demodulation of the metering light, it is necessary to calibrate the reference light and calculate the demodulation coefficient required in the process of demodulation. Analyze the correctness of the demodulation coefficients according to the principle of polarization spectrum measurement to eliminate the influence of installation and adjustment errors on the demodulation work. At the same time, the source spectrum of the unmodulated halogen lamp was measured and compared with the recovery result as reference light to verify the accuracy of polarization spectrum recovery under different toe-cutting functions. The results show that choosing the appropriate toe-cutting function according to the design index of the polarization spectral measurement system can reduce the spectral leakage effect caused by the truncation of light intensity information, reduce the aliasing information between different channels in the optical path difference domain, and improve the accuracy of polarization spectral recovery. The maximum error of polarization of linear polarized light with different toe-cutting functions is reduced from 0.059 3 to 0.001 4, and the polarization is close to 1. The above research provides an important reference for eliminating the “ring” effect caused by spectral aliasing in the process of intensity-modulated polarization spectrum measurement.

Key words: Measurement technique of polarization spectrum; High resolution spectrometer; Toe-cutting function; Windowed interpolation FFT transformation algorithm; Spectrum leakage effect

OCIS Codes: 300.6300; 300.6190; 070.2025; 220.4830

Foundation item: Key Deployment Project of the Marine Science Research Center of the Chinese Academy of Sciences (No. COMS2019J04), National Natural Science Foundation of China (Nos. U2006209, 41575023), Key Research and Development Program of Shandong Province (No. 2020CXGC010706), Excellent Researcher Plan Project (No. 202112003), Consulting Research Project of Chinese Academy of Engineering (No. 2020-XZ-5-03), Scientific research Funds of Taishan Scholars(No. 202105033008)