

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

弹光差频调制全Stokes矢量测量及修正方法研究

白沁, 张瑞, 薛鹏, 王志斌, 孔泉慧子

引用本文:

白沁, 张瑞, 薛鹏, 等. 弹光差频调制全Stokes矢量测量及修正方法研究[J]. 光电工程, 2025, 52(5): 240284.

Bai Q, Zhang R, Xue P, et al. Research on the all-Stokes vector measurement and correction method via elastic-optic difference frequency modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(5): 240284.

<https://doi.org/10.12086/oe.2025.240284>

收稿日期: 2024-12-03; 修改日期: 2025-03-31; 录用日期: 2025-03-31

相关论文

弹光调制器谐振特性研究及其谐振频率自跟踪

李坤钰, 李克武, 刘坤, 王志斌

光电工程 2023, 50(4): 220249 doi: 10.12086/oe.2023.220249

频率调制连续波激光雷达测量技术的非线性校正综述

李超林, 刘俊辰, 张福民, 曲兴华

光电工程 2022, 49(7): 210438 doi: 10.12086/oe.2022.210438

超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展

柯岚, 章思梦, 李晨霞, 洪治, 井绪峰

光电工程 2023, 50(8): 230117 doi: 10.12086/oe.2023.230117

基于内调制的光纤干涉振动测量系统研究

贾鹏, 谢建东, 楼盈天, 杨晔, 杨涛

光电工程 2025, 52(1): 240233 doi: 10.12086/oe.2025.240233

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

弹光差频调制全 Stokes 矢量测量及修正方法研究

白沁^{1,2}, 张瑞^{1,2*}, 薛鹏¹,
王志斌¹, 孔泉慧子^{1,2}

¹中北大学山西省智能微波光电技术创新中心, 山西 太原 030051;

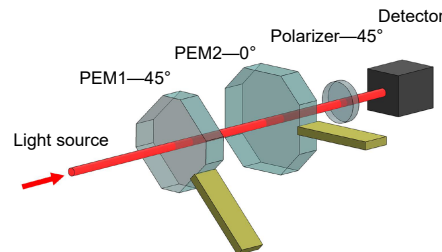
²中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

摘要: 为实现全 Stokes 矢量的高精度测量, 提出一种双弹光调制器 (photoelectric modulator, PEM) 的互差频调制全 Stokes 矢量测量方法。利用两种不同频率的 PEM 对入射光进行差频调制, 被测偏振矢量与 PEM 相位延迟幅值同时被调制在不同的差频分量中。通过奇次差频分量相除操作, 可实时获得 PEM 相位延迟幅值。结合不同差频分量, 精确获得被测光 Stokes 矢量。该方法可减小 PEM 测量系统中相位延迟幅值波动引入的误差。理论及实验分析结果显示, 测得 Stokes 矢量方差在 10^{-5} 量级, 该方法将对高精度偏振测量提供支撑。

关键词: 弹光差频调制; Stokes 矢量; 相位延迟幅值修正

中图分类号: TN247

文献标志码: A



白沁, 张瑞, 薛鹏, 等. 弹光差频调制全 Stokes 矢量测量及修正方法研究 [J]. 光电工程, 2025, 52(5): 240284

Bai Q, Zhang R, Xue P, et al. Research on the all-Stokes vector measurement and correction method via elastic-optic difference frequency modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(5): 240284

Research on the all-Stokes vector measurement and correction method via elastic-optic difference frequency modulation

Bai Qin^{1,2}, Zhang Rui^{1,2*}, Xue Peng¹, Wang Zhibin¹, Kong Quanhuizi^{1,2}

¹Technology Innovation Center of Shanxi Provincial for Intelligent Microwave Photoelectric, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract: To achieve high-precision measurement of the all-Stokes vector, a mutual differential frequency modulation approach for dual photo-elastic modulators (photoelectric modulator, PEM) in all-Stokes vector measurement was proposed. The incident light was differently frequency modulated by two PEMs of different frequencies. The measured polarization vector and the phase delay amplitude of the PEM were simultaneously modulated at different differential frequency components. The phase delay amplitude of the PEM was obtained in real time by dividing the odd differential frequency components, and the Stokes vector of the measured light was accurately obtained by combining different differential frequency components. This method reduced the error

收稿日期: 2024-12-03; 修回日期: 2025-03-31; 录用日期: 2025-03-31

基金项目: 国家自然科学基金 (62105302)

*通信作者: 张瑞, zhangrui@nuc.edu.cn。

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

introduced by the fluctuation of the phase delay amplitude in the PEM measurement system. Theoretical and experimental analyses were conducted, and the results showed that the variance of the measured Stokes vector was 10^{-5} . This method will provide support for high-precision polarization measurement.

Keywords: elastic differential frequency modulation; Stokes vectors; phase delay amplitude correction

1 引言

偏振探测技术是一种基于偏振光学原理的精密检测手段, 它通过分析光波的偏振状态来获取目标物体的详细信息。这种技术的重要性在于其能够提供比传统光强度探测更丰富的信息内容。偏振光学不仅关注光的强度, 还涵盖光的偏振度、偏振方位角和偏振椭圆率等关键矢量特性, 这些信息对于理解光与物质的相互作用至关重要^[1-5]。Stokes 矢量提供了一种系统的方法来量化和描述光波的偏振特性^[6-7], 该矢量通过四个参数全面表征光波的偏振状态, 从而使得偏振探测技术在多个领域中展现出独特的优势, 例如在提高探测精度、增强目标识别能力、改善遥感技术、提高成像质量、3D 显示技术等领域中发挥重要作用^[5,8-9]。

Stokes 矢量的测量方法多种多样。传统的方法是使用线偏振片和 1/4 波片来分析偏振光, 通过机械旋转偏振片并测量不同角度下的光强度, 从而计算出 Stokes 矢量^[10]。这种方法虽然简单且成本低廉, 但在测量精度和速度上存在局限性。另一种方法是利用达曼光栅的快照式 Stokes 测量技术^[11], 光束通过达曼光栅将待测光束分成四束, 再经过波片和线偏振调制器, 最后由 CCD 采集, 实现光束 Stokes 矢量的快速测量。然而, 达曼光栅的设计通常针对光束偏振态的特殊变化适应性不足。弹光调制技术提供了一种新的解决方案, 通过叠加弹光调制器的频率对光进行调制, 产生载有被测量的高频分量, 并通过锁相放大技术一次获得所有偏振态测量的四个 Stokes 分量^[12]。在现有的双弹光调制技术中^[13], 使用两种不同频率的弹光调制器, 通过差频调制来实现偏振态的测量。但是弹光晶体的相位延迟幅值对最终结果有很大的影响, 文献 [14] 中分析了弹光晶体相位延迟幅值微小变化带来的误差, 并对其进行了一定的修正和分析, 但其相位延迟幅值的获取不具有良好的时效性。

采用双 PEM 偏振态测量系统, 通过上位机控制, 能够实时精确获取并显示双弹光晶体的相位延迟幅值, 并直接从根本的理论公式中加以修正, 在一次测量中

高精度计算 Stokes 矢量的四个分量。实验结果表明, 通过理论分析、实验数据归一化处理及误差分析, 该系统展现出时效性强、精度高及响应快速的优势特性, 进一步验证了测量方案的技术可行性和优势。

2 测量原理

弹光调制器 (Photo-elastic modulator, PEM) 是一种先进的相位调制器件, 利用光弹性效应来实现光波偏振态的调制。选用熔融石英晶体作为弹光晶体, 而压电石英晶体采用 -18.5° 单转角切型, 为长度伸缩模式。采用高压谐振电路产生周期性的正弦变化, 将其加在压电晶体两端驱动弹光调制器受迫振动, 产生周期性的双折射现象^[15-16] 和对应的谐振频率。这种双折射的变化使通过调制器的光波相位产生相应变化, 从而实现光波偏振态的精确控制^[17-18]。PEM 偏振调制分为纯行波和纯驻波调制, 纯行波调制是使快轴方向高速旋转; 在测量中, 使用纯驻波调制, PEM 的轴向不变, 通过电压驱动, 进行高速周期性双折射相位延迟幅值的调制。目前, 常用的 PEM 均工作在纯驻波模式下, 实现偏振的高速调制。

采用的弹光调制晶体为八角形, 其具有对称结构, 该特性提供了更大的相位调制范围、更大的通光孔径和对称的相位调制分布, 同时对称的支撑结构对其支撑引起的应力双折射不敏感, 具有更小的残余应力双折射。在驱动电路作用下, 弹光调制器进行受迫振动, 产生一个正弦波形的相位延迟^[19], 其数学表达式为

$$\delta = \delta_0 \sin(2\pi ft), \quad (1)$$

式中: δ_0 为调制幅值; f 为弹光调制器的调制频率; t 为时间。调制幅值 δ_0 ^[20] 的计算式为

$$\delta_0 = \frac{2\pi d}{\lambda} k V_m, \quad (2)$$

式中: d 为通光晶体厚度; λ 为激光器波长; k 为晶体系数; V_m 为压电晶体驱动电压峰值。弹光调制器的控制电路与压电效应仿真结构图, 如图 1 所示。

图 1(b) 显示了 PEM 谐振时的振动位移情况, 其

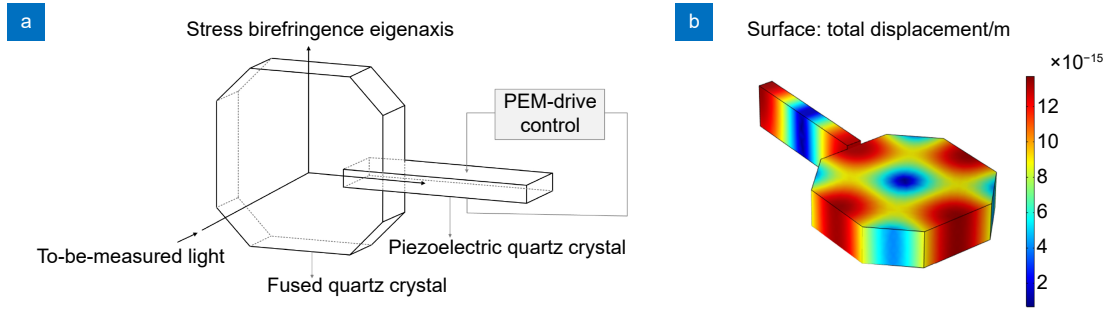


图 1 PEM 电压驱动控制。(a) PEM 控制结构; (b) 压电效应仿真结构

Fig. 1 PEM voltage drive control. (a) PEM control structure; (b) Piezoelectric effect simulation structure

振动方向沿 x 轴和 y 轴。图 1(b) 用颜色表示振动位移的程度, 蓝色代表振动位移最小, 红色代表振动位移最大。现有研究可知^[21], 在 PEM 处于谐振工作时, 中心应力最大、振动位移最小且整个 PEM 调制通光孔径较大, 此时对实验误差的影响最小。因此, 在实验中, 光束垂直通过 PEM 中心孔径。

根据弹光调制器的相位调制原理, 设计了一种双弹光差频调制的 Stokes 矢量测量系统, 如图 2 所示。

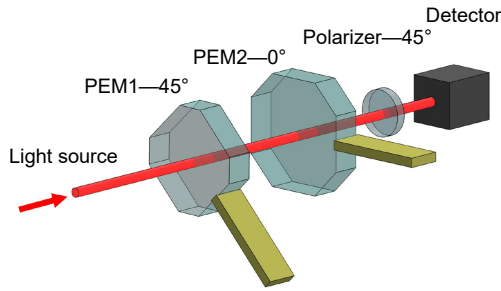


图 2 弹光差频调制 Stokes 测量基本原理图

Fig. 2 Basic principle diagram of hetero-dyne modulation Stokes measurement

待测光依次经过弹光调制器 1 (PEM1)、弹光调制器 2 (PEM2)、检偏器 (P) 和探测器。PEM1 的调制轴与 x 轴夹角为 45° , PEM2 的调制轴与 x 轴夹角为 0° , 检偏器透光轴方向为 45° 。被探测光的 Stokes 矢量用入射光 Stokes 矢量和传播过程变化的缪勒矩阵描述为

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M}_P \mathbf{M}_{\text{PEM1}} \mathbf{M}_{\text{PEM2}} \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{S}_{\text{in}}$ 和 $\mathbf{S}_{\text{out}}$ 分别为入射光和出射光的 Stokes 矢量, $\mathbf{S}_{\text{in}} = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]$, 其中 S_0 表示总光强, S_1 表示沿 x 轴方向振动的光强与沿 y 轴方向振动的光强之差, S_2 表示与 x 轴呈 $\pm 45^\circ$ 方向上的光强之差, S_3 表示左旋成分和右旋成分光强之差; $\mathbf{M}_{\text{PEM1}}$ 、 $\mathbf{M}_{\text{PEM2}}$ 和 $\mathbf{M}_P$ 分别

为两个弹光晶体和检偏器的缪勒矩阵。

$$\mathbf{M}_{\text{PEM1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\delta_1 & 0 & -\sin\delta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin\delta_1 & 0 & \cos\delta_1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{\text{PEM2}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\delta_2 & \sin\delta_2 \\ 0 & 0 & -\sin\delta_2 & \cos\delta_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: δ_1 和 δ_2 分别为 PEM1 和 PEM2 的相位延迟。 δ_1 和 δ_2 可表示为

$$\begin{cases} \delta_1 = \delta_{10} \sin(2\pi f_1 t) \\ \delta_2 = \delta_{20} \sin(2\pi f_2 t) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: δ_{10} 和 δ_{20} 分别为 PEM1 和 PEM2 的相位调制幅度; f_1 和 f_2 分别为 PEM1 和 PEM2 的谐振频率。最终, 探测器探测到的输出光强的表达式为

$$I_{\text{out}} = 0.5 (S_0 + S_2 \cos\delta_2 + S_3 \cos\delta_1 \sin\delta_2 + S_1 \sin\delta_1 \sin\delta_2). \quad (6)$$

贝塞尔函数 (Bessel function, Bessel 函数) 的展开式为

$$\begin{cases} \cos(x \sin 2\pi f t) = J_0(x) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m}(x) \cos(2m2\pi f t) \\ \sin(x \sin 2\pi f t) = 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m-1}(x) \sin[(2m-1)2\pi f t] \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $J_i(\cdot)$ 表示

将式 (5)、式 (7) 带入式 (6) 中, 进一步展开得

$$\begin{cases}
I_{\text{out}} = 0.5S_0 + 0.5S_2 \left[J_0(\delta_{20}) + 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_n(\delta_{20}) \cos(2\pi f_2 t) \right] + 0.5S_3 \left[J_0(\delta_{10}) + 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_n(\delta_{10}) \cos(2\pi f_1 t) \right] \\
\cdot 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_m(\delta_{20}) \cos(2\pi f_2 t) + 2S_1 \sum_{m_1=1}^{\infty} J_{m_1}(\delta_{10}) \cos(2\pi f_1 t) \sum_{m_2=1}^{\infty} J_{m_2}(\delta_{20}) \cos(2\pi f_2 t) \\
= 0.5[S_0 + S_2 J_0(\delta_{20})] + S_2 \sum_{n=0}^{\infty} J_n(\delta_{20}) \cos(2\pi f_2 t) + S_3 \left[J_0(\delta_{10}) \sum_{m=1}^{\infty} J_m(\delta_{20}) \cos(2\pi f_2 t) \right. \\
\left. + 2 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} J_n(\delta_{10}) J_m(\delta_{20}) \cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t) \right] + 2 \sum_{m_1=1}^{\infty} \sum_{m_2=1}^{\infty} J_{m_1}(\delta_{10}) J_{m_2}(\delta_{20}) \cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t)
\end{cases}, \quad (8)$$

式中: m_1 、 m_2 为奇数; n 为偶数; $J_i(\cdot)$ 表示 i 阶的 Bessel 函数。

根据探测器探测光强的 Bessel 函数展开式, 结合锁相放大可得到不同频率的信号幅值, 表示为

$$\begin{cases}
I_{\text{dc}} = 0.5S_0 + 0.5S_2 J_0(\delta_{20}) \\
I_{n(2\pi f_2)} = S_2 J_n(\delta_{20}) \\
I_{m(2\pi f_2)} = S_3 J_0(\delta_{10}) J_m(\delta_{20}) \\
I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)} = 2S_1 J_{m_1}(\delta_{10}) J_{m_2}(\delta_{20})
\end{cases}, \quad (9)$$

式中: I_{dc} 表示直流分量; $I_{n(2\pi f_2)}$ 为 PEM2 的偶倍频分量; $I_{m(2\pi f_2)}$ 为 PEM2 的奇倍频分量; $I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}$ 为 PEM1 与 PEM2 的奇倍频分量之和。

根据不同频率信号幅值和式 (8) 计算, 求出被测光的 Stokes 参量的四个元素, 表达式为

$$\begin{cases}
S_0 = 2I_{\text{dc}} - \frac{I_{n(2\pi f_2)}}{J_n(\delta_{20})} J_0(\delta_{20}) \\
S_1 = \frac{I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}}{2J_{m_1}(\delta_{10}) J_{m_2}(\delta_{20})} \\
S_2 = \frac{I_{n(2\pi f_2)}}{J_n(\delta_{10})} \\
S_3 = \frac{I_{m(2\pi f_2)}}{J_0(\delta_{10}) J_m(\delta_{20})} = \frac{I_{n(2\pi f_1)+m(2\pi f_2)}}{2J_n(\delta_{10}) J_m(\delta_{20})}
\end{cases}. \quad (10)$$

$$\begin{cases}
S_0 = 2I_{\text{dc}} - \frac{I_{n(2\pi f_2)}}{J_n(\delta_{20})} J_0 \left(f_{J_{m_2}/J_{m_2+2}}^{-1} \left(\frac{I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}}{I_{m_1(2\pi f_1)+(m_2+2)(2\pi f_2)}} \right) \right) \\
S_1 = \frac{I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}}{2J_{m_1} \left(f_{J_{m_1}/J_{m_1+2}}^{-1} \left(\frac{I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}}{I_{(m_1+2)(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}} \right) \right) J_{m_2} \left(f_{J_{m_2}/J_{m_2+2}}^{-1} \left(\frac{I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}}{I_{m_1(2\pi f_1)+(m_2+2)(2\pi f_2)}} \right) \right)} \\
S_2 = \frac{I_{n(2\pi f_2)}}{J_n \left(f_{J_{m_1}/J_{m_1+2}}^{-1} \left(\frac{I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}}{I_{(m_1+2)(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}} \right) \right)} \\
S_3 = \frac{I_{m(2\pi f_2)}}{J_0 \left(f_{J_{m_1}/J_{m_1+2}}^{-1} \left(\frac{I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}}{I_{(m_1+2)(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}} \right) \right) J_m \left(f_{J_{m_2}/J_{m_2+2}}^{-1} \left(\frac{I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}}{I_{m_1(2\pi f_1)+(m_2+2)(2\pi f_2)}} \right) \right)}
\end{cases}. \quad (12)$$

3 实验分析

3.1 实验装置系统组成

测量系统由三部分组成, 如图 3 所示。第一部分为光路测量, 由起偏器和 1/4 波片组成的参考部分产

根据式 (8) 和贝塞尔函数比值 $y = \frac{J_i(x)}{J_j(x)}$ (j 表示贝

塞尔函数的阶次) 创造其反函数模型, 式 (10) 依据其建立, 计算获得第一弹光调制器 (PEM1) 和第二弹光调制器 (PEM2) 的任意时刻相位延迟幅值 δ_{10} 和 δ_{20} :

$$\begin{cases}
\delta_{10} = f_{J_{m_1}/J_{m_1+2}}^{-1} \left(\frac{I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}}{I_{(m_1+2)(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}} \right) \\
\delta_{20} = f_{J_{m_2}/J_{m_2+2}}^{-1} \left(\frac{I_{m_1(2\pi f_1)+m_2(2\pi f_2)}}{I_{m_1(2\pi f_1)+(m_2+2)(2\pi f_2)}} \right) = f_{J_{m_1}/J_{m_1+2}}^{-1} \left(\frac{I_{m(2\pi f_2)}}{I_{(m+2)(2\pi f_2)}} \right) \\
= f_{J_{m_1}/J_{m_1+2}}^{-1} \left(\frac{I_{n(2\pi f_2)}}{I_{(n+2)(2\pi f_2)}} \right)
\end{cases}. \quad (11)$$

实验通过数字锁相放大处理电路, 可以得到直流分量 I_{dc} 、交流频率 $n\omega_2$ 、差频 $m_1\omega_1 + m_2\omega_2$ 的幅值, 其中 ω_1 、 ω_2 分别为 $2\pi f_1$ 、 $2\pi f_2$, 结合实时获得弹光调制器的相位延迟幅值, 将数字锁相获得的结果通过通用串行总线上传到上位机, 进行准确计算并实时显示被测光的 Stokes 矢量 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 。

生不同的椭圆偏振光, PEM1、PEM2、P 和探测器组成偏振态测量部分。第二部分为电路控制, 主要包含弹光驱动控制电路和多路数字锁相放大电路。第三部分为上位机, 用于接收处理数据、分析数据和显示测量结果。

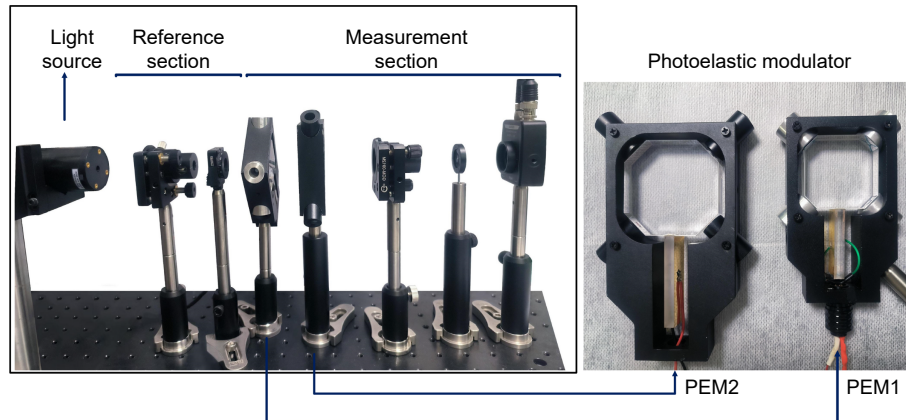


图3 弹光差频调制 Stokes 测量装置

Fig. 3 Elastic optical difference frequency modulation Stokes measuring device

光源的波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光, 输出光波为线偏振态, 经过参考部分后, 根据需求可转换成特定的椭圆偏振光; PEM1 的谐振频率为 59.453 kHz, 调制轴与 x 轴夹角为 45° , PEM2 的谐振频率为 44.859 kHz, 调制轴与 x 轴夹角为 0° , 材料均为熔融石英晶体; P 为格兰泰勒棱镜, 透光轴方向为 45° ; 探测器使用为 PDA10A2, 其探测波长范围为 200~1100 nm, 可精确探测到波长为 632.8 nm 的光源光波。

3.2 倍频信号与相位延迟幅值的选择

在数据传输中, 使用高采样率的 ADC 转化芯片, 采样率高达 6.25 MHz, 采样周期约为 0.16 μ s, 小于 0.30 μ s。在快速变化的频率信号中, 能够更精确地捕捉到信号细节, 提高采样的信噪比。通过分析式 (8) 和式 (10), 使用的各频率分量为 $2\omega_2$ 、 $\omega_1 + \omega_2$ 、 $2\omega_1 + \omega_2$ 、 $3\omega_1 + \omega_2$ 、 $\omega_1 + 2\omega_2$, 直流分量为 I_{dc} ^[21]。使用低倍频的差频分量可提高信号处理的稳定性和准确性。低倍频的差频通常具有较低的频率, 由于他们受到的噪声干扰较小, 在信号处理过程中转换速度较慢, 因此更容易被分离和测量, 在数字锁相放大器进行锁相放大时更容易被精确提取, 从而提高测量的精确性和可靠性。另外高倍频信号中包含的有用信息少于低频信号, 且噪声的干扰随着频率增大而增强, 对其检测高频信号的硬件要求也越高, 数据计算量增大, 后期数据处理更加复杂。

经以上分析, 在一次测量中, 只需探测信号的低频分量 ($2\omega_2$ 、 $\omega_1 + \omega_2$ 、 $2\omega_1 + \omega_2$ 、 $3\omega_1 + \omega_2$ 、 $\omega_1 + 2\omega_2$) 和直流分量 I_{dc} , 就可以实现对被测光的 Stokes 矢量分量 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 的测量。

相位延迟幅值 δ_{10} 和 δ_{20} 的大小选择对最终的测量结果影响很大, 根据式 (8)、式 (9) 和式 (10) 以及 n 阶贝塞尔函数拟合图合理选择。

当 $\delta_{10} = \delta_{20} = 2.409$ 时, $J_0(\delta_{10}) = J_0(\delta_{20}) = 0$, 为了确保测量的准确性, 相位延迟幅值选值小于 2.409 时, 一阶、二阶、三阶的贝塞尔系数均为正值。根据式 (2) 可知, 通过修改驱动电压从而实现对相位延迟幅值的调控。当相位延迟幅值选择 2.141 时, 可保证 J_0 、 J_1 、 J_2 、 J_3 均为较大值, 有利于提高有用信号的信噪比。在实际测量中, 通过修改两个弹光驱动电路的电压, 使得相位延迟幅值 δ_{10} 与 δ_{20} 在 2.141 附近。

4 数据分析

对已知的具有 5 种不同偏振态的待测光进行 Stokes 分量的测量, 每种进行 30 次重复测量, 验证实验测量结果的准确性。利用弹光驱动电路驱动 PEM1 和 PEM2, 待测光垂直入射于弹光调制器的中心, 从检偏器的中心穿过后, 被探测器接收。模数转换芯片采集探测器输出的信号, 由数字锁相放大器放大处理得到直流分量 I_{dc} 、交流频率单偶倍频 $n\omega_2$ 和差频 $m_1\omega_1 + m_2\omega_2$ 的幅值, 将数字锁相获得结果通过通用串行总线上传到上位机, 从而由式 (11) 计算出被测光的 Stokes 矢量 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 。

对计算获得的原始数据进行归一化处理, 以消除不同测量条件下可能存在的系统偏差。归一化处理后的数据能够更真实地反映待测光的固有特性, 为不同偏振态提供了统一的标准。为了验证测量数据的稳定性, 对每组数据进行方差分析, 通过计算每组数据的方差, 量化测量结果的离散程度, 从而评估重复测量

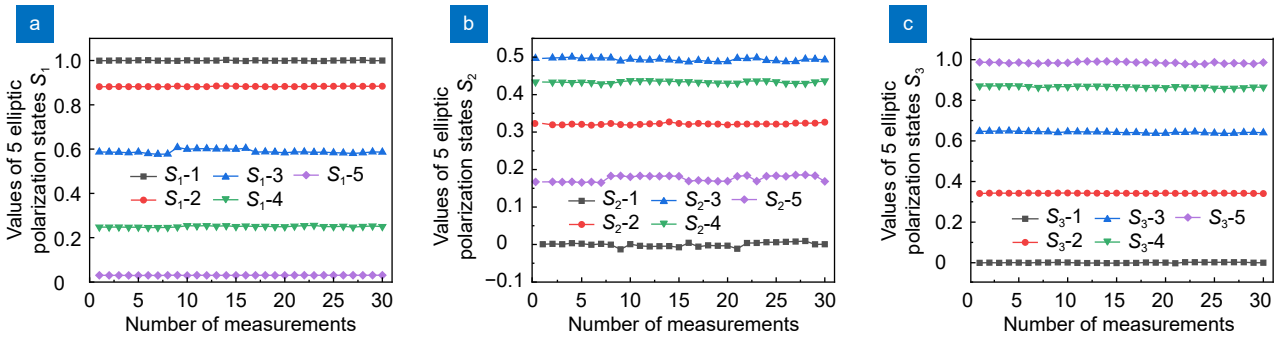


图 4 椭圆偏振光的 Stokes 矢量测量结果。(a) 测量不同椭圆偏振光的 S_1 值; (b) 测量不同椭圆偏振光的 S_2 值; (c) 测量不同椭圆偏振光的 S_3 值

Fig. 4 Stokes vector measurement results of elliptically polarized light. (a) S_1 for different elliptically polarized light is measured; (b) S_2 for different elliptically polarized light is measured; (c) S_3 for different elliptically polarized light is measured

表 1 5 组不同椭圆偏振光的测量数据方差

Table 1 Variance of measured data of 5 different elliptically polarized light

Parameter	Polarization state 1	Ppolarization state 2	Polarization stadte 3	Polarization state 4	Polarization state 5
S_1	1.0×10^{-5}	1.1×10^{-6}	1.9×10^{-5}	7.2×10^{-6}	1.9×10^{-7}
S_2	2.7×10^{-5}	3.1×10^{-6}	1.6×10^{-5}	7.4×10^{-6}	9.8×10^{-6}
S_3	2.3×10^{-6}	5.7×10^{-7}	1.1×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.4×10^{-5}

的一致性。

对 5 组不同椭圆偏振光的 Stokes 矢量进行了系统性的重复测量, 共计 30 次。如图 4 所示, 归一化以及误差处理后的 Stokes 矢量结果表明, S_1 、 S_2 、 S_3 测量方差达到了显著的统计水平, 不同颜色代表不同的椭圆偏振状态, -1、-2、-3、-4、-5 表示测量的 5 种不同的椭圆偏振状态。在现有研究中^[13], 其偏振态测量重复性标准差小于 0.2%。本实验中 S_1 、 S_2 、 S_3 的测量方差分别为 $\delta_{S_1}^2 = 1.0 \times 10^{-5}$ 、 $\delta_{S_2}^2 = 2.7 \times 10^{-5}$ 和 $\delta_{S_3}^2 = 1.8 \times 10^{-5}$, 这说明系统的稳定性和可靠性有显著提升。5 组不同椭圆偏振光的测量数据的方差如表 1 所示。但在实验过程中, 难以确保入射光始终精准地垂直入射光学器件的中心表面, 不可避免地会存在一定的入射偏角。此外, 在参考光路中, 通过调整起偏器通光轴与 1/4 波片快轴方向的夹角 θ 来引入具有不同椭圆状态的待测光。然而, θ 的实际值可能存在偏差, 导致待测光的理论计算值并非完全符合标准值, 进而引入了一定的测量误差。

5 结 论

利用双弹光调制器的差频调制全 Stokes 矢量测量技术提高了全 Stokes 的测量精度。利用两个不同调制频率的 PEM 对入射光进行差频调制, 被测偏振参数

与两个 PEM 的相位延迟幅值同时被调制在不同的差频分量中, 通过锁相奇次差频分量相除实时获得 PEM 的相位延迟幅值, 结合不同差频分量精确获得被测光 Stokes 矢量的 4 个参量。该方法不仅简化了传统测量方法中机械旋转的复杂性, 还减少了双 PEM 测量系统中相位延迟幅值波动引入的测量误差。实验结果显示, 该方法测得 Stokes 矢量方差在 10^{-5} 量级, 采样周期小于 0.30 μs 。这将对高精度快速偏振测量提供技术支撑。未来的工作将聚焦于优化系统性能、减小系统体积和探索该方法在更广泛的光学应用中的潜力。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Dai W T, Wang J J, Xie X, et al. Requirements and development of polarization detection technology[J]. *Electro-Opt Technol Appl*, 2023, 38(5): 6-12,82.
戴万田, 王锦津, 谢欣, 等. 偏振探测技术的应用需求发展研究[J]. *光电技术应用*, 2023, 38(5): 6-12,82.
- [2] Luo H B, Zhang J C, Gai X Q, et al. Development status and prospects of polarization imaging technology (Invited)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2022, 51(1): 20210987.
罗海波, 张俊超, 盖兴琴, 等. 偏振成像技术的发展现状与展望 (特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(1): 20210987.
- [3] Dai P Z, Yao D, Ma T X, et al. Analysis of polarization detector performance parameters on polarization 3D imaging

- accuracy[J]. *Sensors*, 2023, **23**(11): 5129.
- [4] Pierangeli D, Conti C. Single-shot polarimetry of vector beams by supervised learning[J]. *Nat Commun*, 2023, **14**(1): 1831.
- [5] Yi S Y, Kim D, Na J, et al. Spin-weighted spherical harmonics for polarized light transport[J]. *ACM Trans Graph*, 2024, **43**(4): 127.
- [6] Sun Z Q, Huang Y H, Bao Y L, et al. Polarized remote sensing: a note on the stokes parameters measurements from natural and man-made targets using a spectrometer[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2017, **55**(7): 4008–4021.
- [7] Adhiya A, Shah M, Pandya A, et al. A simple device for simultaneous measurement of Stokes polarization parameters[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2023, **72**: 7001606.
- [8] Zuo J W, Bai J, Choi S, et al. Chip-integrated metasurface full-Stokes polarimetric imaging sensor[J]. *Light Sci Appl*, 2023, **12**(1): 218.
- [9] Guo X Y, Li P, Zhong J Z, et al. Stokes meta-hologram toward optical cryptography[J]. *Nat Commun*, 2022, **13**(1): 6687.
- [10] Hu Y Q, Jiang Y T, Zhang Y, et al. Achromatic full Stokes polarimetry metasurface for full-color polarization imaging in the visible range[J]. *Nano Lett*, 2024, **24**(41): 13018–13026.
- [11] Xu C J, Zhao J S, Cai Y, et al. Several schemes of infrared polarization imaging[J]. *Infrared Technol*, 2009, **31**(5): 262–266. 徐参军, 赵劲松, 蔡毅, 等. 红外偏振成像的几种技术方案[J]. *红外技术*, 2009, **31**(5): 262–266.
- [12] Tang F C, Bu Y, Wu F, et al. Snapshot Stokes polarimetry method based on Damman grating[J]. *Acta Opt Sin*, 2023, **43**(13): 1312002. 唐凡春, 步扬, 吴芳, 等. 基于达曼光栅的快照式斯托克斯偏振测量方法[J]. *光学学报*, 2023, **43**(13): 1312002.
- [13] Li K Y, Wang Z B, Li K W, et al. Research on digital phase locked data processing of generalized polarization measurement with dual photoelastic modulation[J]. *Opt Tech*, 2023, **49**(1): 51–56, 96. 李坤钰, 王志斌, 李克武, 等. 双弹光调制广义偏振测量的数字锁相数据处理研究[J]. *光学技术*, 2023, **49**(1): 51–56, 96.
- [14] Wang L F, Wang Z B, Li X, et al. Measurement of the polarization Stokes parameters based on photoelastic-modulation and its error analysis[J]. *Laser Technol*, 2014, **38**(2): 255–259. 王立福, 王志斌, 李晓, 等. 弹光调制偏振 Stokes 参量测量及误差分析[J]. *激光技术*, 2014, **38**(2): 255–259.
- [15] Wu Y T, Xiong W, Li C B. Review and principle verification of photoelastic modulator[J]. *Piezoelectr Acoustoopt*, 2021, **43**(3): 352–358. 武燕婷, 熊伟, 李超波. 光弹调制器研究综述及原理验证[J]. *压电与声光*, 2021, **43**(3): 352–358.
- [16] Zhou J. Mueller matrix analysis of photoelastic modulator[J]. *J Changshu Coll*, 2001, **15**(4): 19–22. 周军. 光弹调制器应用的 Mueller 矩阵分析[J]. *常熟高专学报*, 2001, **15**(4): 19–22.
- [17] Xing T L, Veetil S P, Lin Q, et al. Elliptically polarized light photoelasticity based on LCD[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(17): 28161–28173.
- [18] Li K W, Wang S, Wang L M, et al. Research on rapid and high-sensitivity ellipsometry employing multi-harmonic terms of dual cascade photoelastic modulators[J]. *Opt Lasers Eng*, 2024, **178**: 108235.
- [19] Zhang R, Xue P, Li K W, et al. Double-PEM polarization state analysis accurate correction device and method: 115683563A[P]. 2023-02-03. 张瑞, 薛鹏, 李克武, 等. 一种双 PEM 偏振态分析精确修正装置及方法: 115683563A[P]. 2023-02-03.
- [20] Yang J Y, Han P G, Wei Y Y. New calibration method for photoelastic modulator without frequency response[J]. *Chin J Lasers*, 2024, **51**(8): 0804007. 杨军营, 韩培高, 魏莹莹. 无频响影响的光弹调制器定标新方法[J]. *中国激光*, 2024, **51**(8): 0804007.
- [21] Liu Z L, Wang Z B, Li K W, et al. A precise calibration microsystem for photoelastic modulator[J]. *Opt Tech*, 2022, **48**(1): 8–13. 刘梓良, 王志斌, 李克武, 等. 一种弹光调制器精确定标微系统设计[J]. *光学技术*, 2022, **48**(1): 8–13.

作者简介



白沁 (2002-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为弹光调制测量技术。

E-mail: 3202869378@qq.com



【通信作者】张瑞 (1987-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事于弹光调制、光谱偏振测量、光电探测等方面的研究。

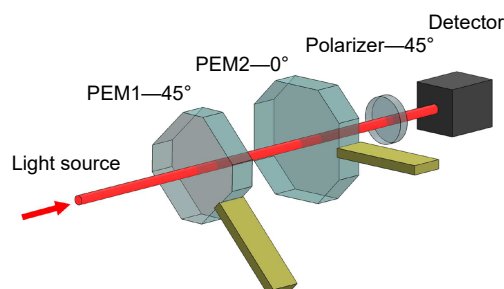
E-mail: zhangrui@nuc.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Research on the all-Stokes vector measurement and correction method via elastic-optic difference frequency modulation

Bai Qin^{1,2}, Zhang Rui^{1,2*}, Xue Peng¹, Wang Zhibin¹, Kong Quanhuizi^{1,2}



Basic principle diagram of hetero-dyne modulation Stokes measurement

Overview: The comprehensive measurement of all-Stokes vector is of paramount importance across various scientific disciplines such as optics, light scattering theory, atmospheric science, and quantum mechanics, where understanding and applying light-matter interactions is crucial. Traditional methods often employ linear polarizers and quarter-wave plates to analyze polarized light, requiring mechanical rotation of the polarizer and measurement of light intensity at different angles to calculate the Stokes vector. Although these methods are simple and cost-effective, they may be limited in terms of measurement precision and speed. Another approach utilizes the snapshot Stokes measurement technique with a Dammer grating, which divides the incident beam into four beams, modulates them with wave plates and a linear polarizer, and captures the results with a CCD, enabling rapid measurement of the beam's Stokes vector. However, the design of Dammer gratings is often tailored to specific beam polarization states, and their adaptability to varying states is somewhat limited. Photoelectric modulation (PEM) technology offers a novel solution by modulating light with PEMs at frequency superpositions, generating high-frequency components carrying the measured polarization state information, and acquiring all four Stokes parameters simultaneously using lock-in amplification techniques. We proposed a new method for high-precision all-Stokes vector measurement based on dual PEMs. This technique leveraged two PEMs with different modulation frequencies to heterodyne modulate the incident light. We simultaneously modulated the measured polarization parameters with the phase delay amplitudes of the two PEMs in distinct beat frequency components. Through phase-locking and dividing the odd-order beat frequency components, the phase delay amplitudes of the two PEMs were obtained in real-time. By combining different beat frequency components with the DC component, the four parameters of the measured light's Stokes vector were precisely acquired and normalized. This method simplifies the complexity of mechanical rotation in traditional measurement methods and reduces measurement errors introduced by phase delay amplitude fluctuations in dual-PEM systems. Theoretically, the Mueller matrix is used to describe the polarization changes of light propagating through the system, and based on this, the expression for the outgoing light's Stokes vector can be calculated. Experimental measurements using known polarization states of light validate the theoretical analysis, with results showing that the variance of the measured Stokes vector is on the order of 10^{-5} , indicating that this technique can provide technical support for high-precision polarization measurements. The high-precision measurement capabilities are of significant practical importance for applications requiring accurate polarization information, such as remote sensing, optical imaging, and physical research, enabling precise control and measurement of the polarization state of light and advancing related scientific fields.

Bai Q, Zhang R, Xue P, et al. Research on the all-Stokes vector measurement and correction method via elastic-optic difference frequency modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(5): 240284; DOI: [10.12086/oee.2025.240284](https://doi.org/10.12086/oee.2025.240284)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62105302)

¹Technology Innovation Center of Shanxi Provincial for Intelligent Microwave Photoelectric, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China; ²School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

* E-mail: zhangrui@nuc.edu.cn