

doi: 10.3788/lop47.040701

基于虚拟仪器的斯托克斯参量测试系统

王立波 石志东 殷俊 陈华

(上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

摘要 采用旋转波片法搭建了一套偏振态斯托克斯参量自动检测系统, 每秒可以处理和显示 15 个偏振椭圆。该系统采用数据采集卡和 LabVIEW 软件来组成虚拟仪器, 通过数据插值与重采样技术对旋转角度进行精确定位, 消除了电机转速不稳定带来的系统误差。根据米勒矩阵得出透射光强随旋转角度的变化方程, 并与实时采集的测量数据进行对比拟合, 通过傅里叶变换得出曲线方程中的待定系数, 给出对应的斯托克斯参量, 并计算光波的电场分量及相位差, 确定出射光的椭圆偏振消光比、长轴方向与椭圆旋向。还考查了本底噪声对测量结果的影响, 比较了旋转波片与旋转检偏器两种测试方法的优缺点。

关键词 偏振态; 旋转波片; 虚拟仪器; 傅里叶变换; 斯托克斯参量

中图分类号 TN744.2 OCIS 070.4560 120.4640 文献标识码 A

Measurement System of Stokes Parameters by Virtual Instrument

Wang Libo Shi Zhidong Yin Jun Chen Hua

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract By the method of rotating quarter-wave plate, an automatic measurement system for the Stokes parameters of polarization state has been set up. It can process and display 15 polarization ellipses per second. The virtual instrument in this system consists of a data acquisition card and the LabVIEW software. The rotating angle is determined precisely by data interpolation and resample, so that the systematic error caused by the instability of rotating motor is depressed. The variation equation of transmitting light intensity with the rotating angle is deduced theoretically by Mueller matrix. The real-time acquired data is compared and fitted with the analytic equation. The coefficients of the variation equation and the correspondent Stokes parameters are given by Fourier transform. The field components and their phase difference of light wave are calculated. The distinction ratio, long axis orientation and spin-wise of polarization ellipse are determined. The influence of background noise on the measurement result is examined. The performances are compared between the two methods of rotating wave-plate and rotating analyzer.

Key words state of polarization; rotating-wave-plate; virtual instrument; Fourier transform; Stokes parameters

1 引言

随着光纤技术的发展, 光的偏振效应已经成为影响光纤通信传输速率和光纤传感器件灵敏度提高的一个重要因素。偏振态的改变对系统的传输性能、传输速率以及传输距离等都有很大影响。光的偏振态测量方法有很多种^[1~3], 并且偏振测试仪也已经实现了产品化, 在测量精度和自动化程度方面都有很好的性能指标。例如美国海因兹仪器公司制造的基于双光电调制器^[4]的斯托克斯偏振仪^[5], 精度高、速度快, 可用

收稿日期: 2009-06-02; 收到修改稿日期: 2009-10-02

基金项目: 国家自然科学基金(60777031)、上海市重点学科和科委重点实验室项目(S30108, 08DZ2231100)和上海市教委创新基金(09YZ31)资助课题。

作者简介: 王立波(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤通信与传感等方面的研究。E-mail: libo.wang@yahoo.com.cn

导师简介: 石志东(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事特种光纤偏振特性方面的研究。

E-mail: zdshi@shu.edu.cn (通信联系人)

波长范围也很大。但是其高昂的价格和对数据采集卡等设备的严格要求限制了它在国内的一些科研机构 and 高校的应用。Grant Nicholson 等^[6]提出使用一个检偏器, 通过旋转检偏器的位置对偏振态进行检测, 这种方法虽然简单, 但只能直接得到斯托克斯矢量的 3 个分量。R. M. A. Azzam^[7]提出了一种侧面分布接触探测的方法, 用 4 个光电二极管同时检测光纤包层中不同角度的倏逝波, 提取光纤偏振态的 4 个斯托克斯参数。这种方法的优点是在不影响光纤传输的同时进行检测, 而且由于在测量过程中不用调节检测器件, 因此可以得到较高的检测速度。缺点是调节难度较高, 尤其是 4 个光电二极管的摆放位置需要精确校准。

本文采用虚拟仪器技术, 利用旋转波片法搭建偏振态斯托克斯参量自动检测系统。将常规的 1/4 波片配入旋转机构, 并对光电二极管的输出信号进行实时采集和数字信号处理, 计算出光波的电场分量及相位差, 给出对应的斯托克斯参量。这种实验方法的测量精度和速度能够基本接近进口产品的指标, 而且硬件成本价格很低。

2 旋转波片法自动检偏系统原理及其虚拟仪器设计

在搭建的实验系统中, 选用指定工作波长(1310 nm)下的 1/4 波片, 配置旋转电机及其驱动电路; 然后在固定角度的检偏棱镜后安装光电二极管, 并配上预放大电路, 将光电流转换成电压信号, 通过数据采集卡将光电信号进行模/数(A/D)转换后导入计算机中。采用直流电机带动波片的旋转, 转速为 30 r/s。选用光电开关对旋转角度进行定位, 通过数据的对齐与重采样技术, 消除转速不稳引起的系统误差, 用 LabVIEW 软件在极坐标下实时显示测量数据。对测量数据进行傅里叶变换, 得出偏振光的斯托克斯各参量。系统的实验框图如图 1 所示。

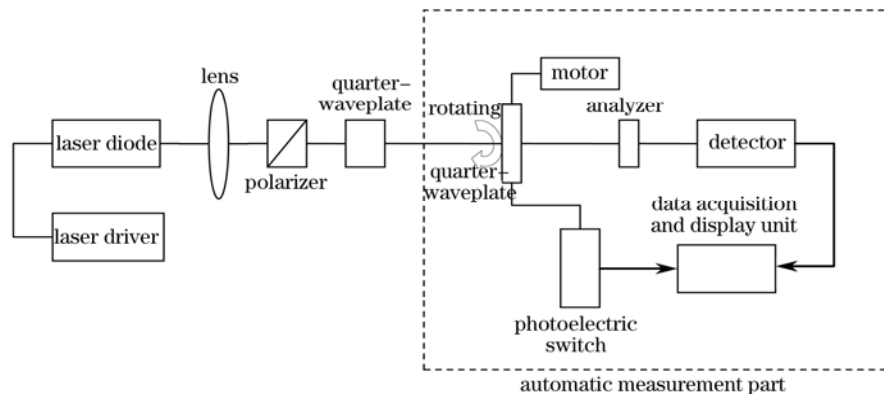


图1 旋转波片法实验框图

Fig.1 Schematic diagram of rotating wave plate

根据图 1 所示的实验光路, 可得出射光强 I 的表达式^[8,9]为

$$I(\theta) = (1, 0, 0, 0)\mathbf{R}(\theta)\mathbf{W}(\delta)\mathbf{R}(-\theta)\mathbf{S}_{in}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{S}_{in} 为待测光偏振态的斯托克斯矢量 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$, $\mathbf{R}(\theta)\mathbf{W}(\delta)\mathbf{R}(-\theta)$ 为波片的米勒传输矩阵, δ 为波片的相位延迟量, θ 为波片的快轴方向与检偏方向所成的夹角。在理想的情况下有:

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ 0 & \sin(-2\theta) & \cos(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{W}(\delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta) & \sin(\delta) \\ 0 & 0 & \sin(-\delta) & \cos(\delta) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

采用 1/4 波片, $\delta = \pi/2$, 可得极坐标下光强 I 与波片旋转角 θ 的关系为

$$I(\theta) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos^2 2\theta + S_2 \sin 2\theta \cos 2\theta + S_3 \sin 2\theta), \quad (3)$$

即

$$I(\theta) = \frac{1}{2}S_0 + \frac{1}{4}S_1 + \frac{1}{2}S_3 \sin 2\theta + \frac{1}{4}S_1 \cos 4\theta + \frac{1}{4}S_2 \sin 4\theta \quad (4)$$

令 $A = \frac{1}{2}S_0 + \frac{1}{4}S_1$, $B = \frac{1}{2}S_3$, $C = \frac{1}{4}S_1$, $D = \frac{1}{4}S_2$, 可得

$$I(\theta) = A + B \sin 2\theta + C \cos 4\theta + D \sin 4\theta, \quad (5)$$

其中

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i, \quad B = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I_i \sin 2\theta_i, \quad C = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I_i \cos 4\theta_i, \quad D = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I_i \sin 4\theta_i. \quad (6)$$

对采集到的光强信号进行傅里叶变换, 可以得到它的直流项 A , $\sin 2\theta$ 项系数 B , $\cos 4\theta$ 项系数 C , $\sin 4\theta$ 项系数 D , 并由此推得待测偏振态的斯托克斯矢量各参数

$$S_0 = 2(A - C), \quad S_1 = 4C, \quad S_2 = 4D, \quad S_3 = 2B. \quad (7)$$

同时, 根据 S_0, S_1, S_2, S_3 与偏振椭圆长短轴 $2a$ 和 $2b$, 椭圆方位角 φ , 场分量 E_{ox} 和 E_{oy} 及其相位差 δ 之间的变换关系, 可以求出待测偏振态的各个参数。由 S_2 和 S_3 可以判断出 $\cos \delta$ 和 $\sin \delta$ 的正负, 由此可以在 $[-\pi, \pi]$ 或 $[0, 2\pi]$ 区域内唯一确定 δ , 判定出椭圆旋向是左旋还是右旋。通过 E_{ox}, E_{oy} 和 δ 这 3 个参量(或者 $2a, 2b$ 和 φ)连续画出从光纤尾端出射光的偏振椭圆。

图 1 中, 从激光二极管尾纤出射的是发散光, 用 10 倍的显微物镜来使光纤尾端的发散光变为平行光, 再经过起偏器把光变成 50 dB 的线偏振光, 然后调节 1/4 波片的快轴方向, 就能产生各种状态的偏振光, 以此作为待测入射光, 检验自动检偏系统的测量精度。把光电探测器的光电流进行放大转换后输出到 NI 公司的 PCI-6014 数据采集卡上(单路最大采样率为 2×10^5 采样点数/秒), 然后再利用 LabVIEW 软件平台进行数字信号处理^[10], 在虚拟仪器面板上动态显示椭圆偏振态的形状和参数。

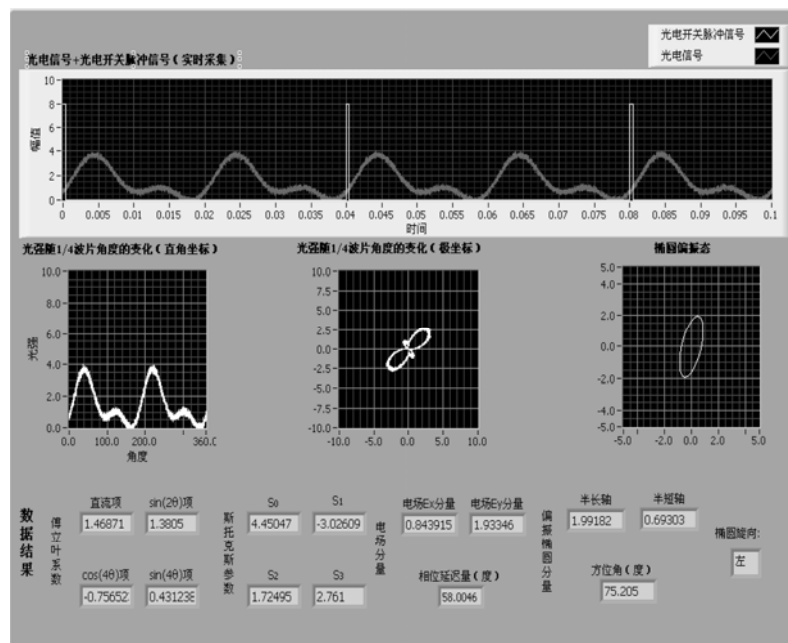


图 2 LabVIEW 程序前面板示意图

Fig.2 Schematic diagram of the LabVIEW front panel

虚拟仪器设计思路为: 首先, 调用 DAQ Assistant 模块来接收数据采集卡获得的波形信号, 该信号是光电信号和光电开关脉冲信号复合交织在一起的(时分复用)。将该信号通过一个信号分离模块重新分离成两路信号, 对光电信号进行对齐和重采样处理。因为光电开关的挡光片总有一定的宽度, 光电开关的上升沿和下降沿之间的间隔所对应的旋转角度略小于 360° , 设定仅以光电开关脉冲信号的上升沿作为触发指

令, 以保证处理的完全是 360° 方位的光强信号。实际效果是波片每旋转两圈, 虚拟仪器只处理其中一圈的数据, 另一圈时间作为计算缓冲以免数据拥堵。为了消除波片旋转速度的不稳定带来的实验误差, 将经过对齐和重采样处理的光电信号进行数组化处理, 把光强信号转化成一维数组, 根据每圈数组的实际长短, 将数组中的每一个数值与波片旋转角度一一对应, 利用 LabVIEW 中的“创建 XY 图”模块和“坐标变换”模块, 可得出在直角坐标和极坐标下光强信号随波片旋转角度的变化波形图。根据(6)式, 可利用 LabVIEW 计算出 A, B, C, D 的值, 进而得到斯托克斯矢量的各个参数的值。在此基础上, 可求出椭圆的各个参数并判断出椭圆的左旋或右旋。最后把各个模块组成部分合在一起, 得到总的 LabVIEW 程序的前面板如图 2 所示。在前面板上, 可以实时地显示出射光强信号的波形和光电开关脉冲信号间的截取相位, 光强信号在直角坐标和极坐标下随波片角度变化的波形, 还能实时地显示傅里叶系数、斯托克斯参量、偏振椭圆的各个参数以及它们的变化情况。

3 讨论与分析

利用 LabVIEW 虚拟仪器平台来动态模拟光强信号的本底噪声对旋转波片法自动检偏系统的影响, 根据加入的高斯噪声的均值是否为零, 分两种情况考察了系统的抗噪声能力。当加入的高斯噪声均值不为 0 时(对应于本底杂散光较强的测量环境), 电场的两个偏振分量 E_x 和 E_y 的测量误差都随着噪声的增大而增大, 并且当两个偏振分量的大小可比拟时, 误差增大的趋势也是一致的, 而偏振相位差的测量误差随本底高斯噪声的变化趋势不明显, 可以看出当用来测量两偏振分量之间的相位差时, 实验系统受噪声影响较小, 如图 3 所示。当两个偏振分量的幅度相差较大时, 幅度较小的偏振分量受噪声影响较大, 如图 4 所示。当加入的高斯噪声均值为 0 时(对应于本底杂散光较弱的测量环境, 噪声仅由光源或检测电路内部引起), 即使两个偏振分量幅度相差较大, 各参数的测量值受噪声的影响也很小, 这是因为此时噪声对傅里叶变换的交流分量系数和直流项均无影响。

常规的旋转检偏器法对待测光波长没有要求, 但是它无法确定相位延迟量的正负号, 因此也就不能判断椭圆的旋向。而旋转波片法就克服了旋转检偏器法的这个缺点, 可以直接得到椭圆的旋向。但是每一个 $1/4$ 波片的测量结果都是针对特定波长的光波的, 一旦光波的波长改变, 波片也就要做相应的改变。

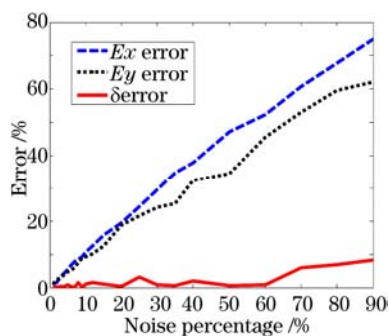


图 3 $E_x=1.6, E_y=1.8, \delta=45^\circ$ 时噪声引起的误差曲线图

Fig.3 Error curve caused by the noise with $E_x=1.6, E_y=1.8, \delta=45^\circ$

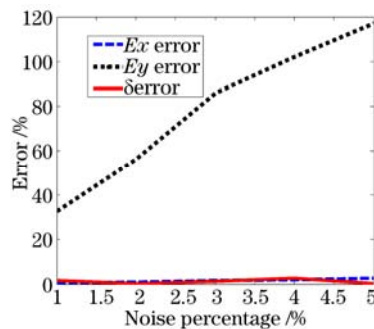


图 4 $E_x=1.7, E_y=0.2, \delta=45^\circ$ 时噪声引起的误差曲线图

Fig.4 Error curve caused by the noise with $E_x=1.7, E_y=0.2, \delta=45^\circ$

4 结 论

利用 LabVIEW 虚拟仪器平台, 对旋转波片法检偏系统中的检测信号进行采集和处理, 通过数据插值和重采样处理, 对旋转角度进行精确定位, 消除了电机转速不稳定带来的系统误差。该系统可以每秒 15 次的速率, 连续检测并显示光学偏振椭圆的动态变化。

参 考 文 献

- 1 Liu Haitao, Wu Chongqing, Dong Hui *et al.*. Study of measuring polarization state in optical fiber[J]. *J. Beijing Jiaotong University*, 2003, **27**(3): 58~62
刘海涛, 吴重庆, 董 晖 等. 光纤偏振态检测方法的研究[J]. 北京交通大学学报, 2003, **27**(3): 58~62
- 2 Yoshinori Namihira, Hiroharu Wakabayashi. Real-time measurements of polarization fluctuations in an optical fiber submarine cable in a deep-sea trial using electrooptic LiNbO₃ device[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(8): 1201~1206
- 3 Qin Zhaoyu, Cheng Zhaogu, Zhang Zhiping *et al.*. High-speed and real-time measurement of stokes parameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 659~662
覃兆宇, 程兆谷, 张志平 等. 偏振光斯托克斯参量的高速实时测量技术[J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 659~662
- 4 Zeng Aijun, Wang Xiangzhao, Dong Zuoren *et al.*. Application of photoelastic modulator in modulation of polarization direction[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1063~1067
曾爱军, 王向朝, 董作人 等. 光弹调制器在偏振方向调制中的应用[J]. 中国激光, 2005, **32**(8): 1063~1067
- 5 Wei Guan, Grenville A. Jones, Yanwei Liu *et al.*. The measurement of the stokes parameters: a generalized methodology using a dual photoelastic modulator system[J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**: 043104
- 6 Grant Nicholson, Douglas J. Temple. Polarization fluctuation measurements on installed single-mode optical fiber cables[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(8): 1197~1200
- 7 R. M. A. Azzma. Longitudinal polarization-dependent coupling of light from an optical fiber to a side-bonded planar proximity detector: application to integrated azimuthally distributed multidetector photopolarimeters[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1990, **2**(12): 893~895
- 8 Wu Chongqing. Optical Waveguide Theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
吴重庆. 光波导理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- 9 Liao Yanbiao. Polarization Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- 10 Robert H. Bishop. LabVIEW 8 Student Edition[M]. Qiao Ruiping, Lin Xin *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008
毕晓普. LabVIEW 8实用教程[M]. 乔瑞萍, 林 欣 等 译. 北京: 电子工业出版社, 2008