

文章编号: 0253-2239(2007)04-0659-4

偏振光斯托克斯参量的高速实时测量技术

覃兆宇 程兆谷 张志平 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要: 为了满足对高速变化的偏振态的测量, 提出一种能够对偏振态实现高速测量的技术。阐述了利用 1/4 波片与起偏器测量偏振光的斯托克斯参量常规的原理和方法, 根据高速测量的要求推导出了新的斯托克斯参量计算公式, 并依据此公式设计了基于多通道偏振态高速测量的方案, 设计了具体的方法并编写了控制与算法程序。测试表明, 该系统的测量速度达到了每秒 700 次偏振态测量, 测量速度主要由电子线路的性能决定, 测得的结果稳定可靠实现了光纤传输偏振态的高速测量。

关键词: 导波光学; 偏振态高速测量; 多通道; 庞加莱球; 斯托克斯参量

中图分类号: TH753+.7 文献标识码: A

High-Speed and Real-Time Measurement of Stokes Parameters

Qin Zhaoyu Cheng Zhaogu Zhang Zhiping Zhu Jianqiang

(The Joint Laboratory for High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: To meet the need for measurement of state of polarization (SOP) altering in high speed, a new technology to realize high-speed state of polarization measurement was proposed. A general means of state of polarization measurement using polarizer and quarter wave plate (QWP) was given, and based on this technology new formulas which can both meet the requirement of high-speed and real-time state of polarization measurement are brought out. To validate the feasibility and stability of the new theory, a particular project of experiment is made. The experimental system can perform over 700 polarization measurements per second, the results show that, measuring speed is mainly determined by the performance of the electronic parts and thus the measuring speed can be greatly accelerated by improving electronic parts of the system, the result is also proved to be credible and stable, and the method is useful.

Key words: guided-wave optics; high-speed measurement of polarized state; multi-channel; Poincaré sphere; Stokes parameters

1 引言

高速度、长距离和大容量是光纤通信发展的必然趋势, 当前我国的光通信骨干网的传输速率已扩充至 OC-768(40 Gb/s), 并且无中继传输距离变得越来越长, 此时光信号的偏振特性对于光纤通信系统产生了不能忽视的影响^[1~4]。偏振态(SOP)的改变能损害系统的传输性能, 限制系统的传输速率和传输距离。光纤折射率的不均匀以及几何形状的不

规则是引起光信号偏振态变化的主要原因, 另外光通信系统中许多有源和无源器件也会引起光信号偏振态的变化^[5]。

常规的偏振态测量方法由于响应速度较慢, 无法应用于偏振态快速变化的情况。为了检测高速光纤通信中的偏振态变化, 国际上有几家大公司如 Agilent 等已有相应的商业化偏振态测量仪, 但其价格相对昂贵。本文采用的高速偏振态测量方法, 相

作者简介: 覃兆宇(1979—), 男, 湖北松滋人, 博士研究生, 主要从事精密光电测控方面的研究。

E-mail: zhaoyu1979@siom.ac.cn

导师简介: 程兆谷(1942—), 男, 江苏盐城人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光技术及其应用和精密光电检测方面的研究。E-mail: zgcheng@siom.ac.cn

收稿日期: 2006-05-11; 收到修改稿日期: 2006-08-29

对于常规方法由于不涉及 1/4 波片与起偏器的机械运动,采用四通道以及四组固定偏转角的起偏器以及 1/4 波片,直接测量偏振光的四个斯托克斯参量,从而提高了系统的响应速度。

2 偏振态的描述

光波的偏振态可采用几种方式进行表述^[6]:

1) 琼斯矩阵法:用含有两个分量的矢量描述 $\mathbf{E}(x, y) = [\mathbf{E}_x \ \mathbf{E}_y]^T$, 其中 \mathbf{E}_x 和 \mathbf{E}_y 均为复数,有大小和相位, T 为转置。

2) 复矢量法:将偏振态用一个复矢量表示。

3) 庞加莱球法:通过定义斯托克斯矢量的分量 S_0, S_1, S_2, S_3 , 其中 S_1, S_2, S_3 就是以 S_0 为半径的球面上的笛卡儿坐标,此球称为庞加莱球,球面上的每点对应一个偏振态。

光波的偏振态可以用三种方法中的任何一种来表示,即用一种方法表示的偏振态可以转换为另一种方法表示,而结果是相同的。由于我们只能检测到输出光的光功率,而不易检测到相位变化,所以用检测斯托克斯矢量的方法来对偏振态检测会相对容易。

对于完全偏振光其 4 个斯托克斯参量之间的关系^[5]:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (1)$$

其中 S_0 为偏振光的总光强, S_1, S_2, S_3 分别为三对正交方向上光强之差: x, y 方向; 与 x, y 夹角为 45° 方向; 左、右旋圆偏振方向, 从而使得对于光波的偏振态测量可以转化为对其 4 个斯托克斯参量的测量。

3 常规的测量方法

目前通用的偏振态测量方法为:在待测光路中引入起偏器和相位延迟器件通过测得调制光强求得斯托克斯参量,调制方法可以分为偏振片的机械旋转、电光或磁光调制。

采用偏振光调制方法的斯托克斯参量检测的具体方法为:采用一个 1/4 波片和一个起偏器对光的偏振态的斯托克斯参量进行检测,先不用 1/4 波片,通过在光路中旋转起偏器,得到 3 个斯托克斯参量 S_0, S_1, S_2 ; 然后再在光路中移入 1/4 波片,通过旋转 1/4 波片得出最后 1 个斯托克斯参量 S_3 。

通过以上方法可以测得光波的斯托克斯参量为

$$\begin{cases} S_0 = I(0^\circ) + I(90^\circ), \\ S_1 = I(0^\circ) - I(90^\circ), \\ S_2 = I(45^\circ) - I(135^\circ), \\ S_3 = I(0^\circ, 135^\circ) - I(0^\circ, 45^\circ), \end{cases} \quad (2)$$

由于涉及到起偏器的转动以及 1/4 波片移入、转动等机械运动,因而只能对偏振态不随时间变动的偏振光测量其斯托克斯参量,而对于现代光纤通信中随时间不断改变偏振态的偏振光无法实现实时测量。

4 高速实时的测量方案

在常规偏振态测量方法中,当偏振光通过夹角分别为 θ_p, θ_q 的起偏器与 1/4 波片,利用偏振元件的矩阵公式:

$$\mathbf{M}(\theta_p) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta_p & \sin 2\theta_p & 0 \\ \cos 2\theta_p & \cos^2 2\theta_p & \cos 2\theta_p \sin 2\theta_p & 0 \\ \sin 2\theta_p & \cos 2\theta_p \sin 2\theta_p & \sin^2 2\theta_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}(\theta_q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta_q & \sin 2\theta_q \cos 2\theta_q & \sin 2\theta_q \\ 0 & \sin 2\theta_q \cos 2\theta_q & \sin^2 2\theta_q & -\cos 2\theta_q \\ 0 & -\sin 2\theta_q & \cos 2\theta_q & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

可得 $S' = \mathbf{M}(\theta_p)\mathbf{M}(\theta_q)\mathbf{S}$, 其中 \mathbf{S} 为光波的初始斯托克斯矢量, $\mathbf{M}(\theta_p)$ 为透射轴与 x 轴夹角为 θ_p 的起偏器对被测光波的作用矩阵, $\mathbf{M}(\theta_q)$ 是 1/4 波片的快轴与 y 轴夹角为 θ_q 时对被测光波的作用矩阵, S' 是被测光通过 1/4 波片和起偏器后的斯托克斯矢量。系统中的光电转换装置可以测得的能量值为^[4]

$$\begin{aligned} I(\theta_q, \theta_p) = & \frac{1}{2} [S_0 + S_1 (\cos 2\theta_p \cos^2 2\theta_q + \sin 2\theta_p \sin 2\theta_q \cos 2\theta_q) + \\ & S_2 (\cos 2\theta_p \sin 2\theta_q \cos 2\theta_q + \sin 2\theta_p \sin^2 2\theta_q) + \\ & S_3 (\cos 2\theta_p \sin 2\theta_q - \sin 2\theta_p \cos 2\theta_q)], \end{aligned} \quad (5)$$

在不移开 $1/4$ 波片的情况下,同时转动 $1/4$ 波片和起偏器,根据(3)式选取 4 组 $1/4$ 波片和起偏器的角度组合,该角度组合应满足原则:1) 代入这些角度值后形成的四元一次方程组有解;2) 便于计算化简,使得方程组解的结果相对简洁。

通过计算最终选定 $(0^\circ, 0^\circ), (0^\circ, 45^\circ), (45^\circ, 45^\circ), (0^\circ, 135^\circ)$ 四组角度组合,代入(3)式计算得到结果:

$$\begin{cases} I(0^\circ, 0^\circ) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1), \\ I(0^\circ, 45^\circ) = \frac{1}{2}(S_0 - S_3), \\ I(45^\circ, 45^\circ) = \frac{1}{2}(S_0 + S_2), \\ I(0^\circ, 135^\circ) = \frac{1}{2}(S_0 + S_3), \end{cases} \quad (6)$$

(6)式求得的解为以能量方式表征的偏振光的 4 个斯托克斯参量:

$$\begin{cases} S_0 = I(0^\circ, 135^\circ) + I(0^\circ, 45^\circ), \\ S_1 = 2I(0^\circ, 0^\circ) - I(0^\circ, 45^\circ) - I(0^\circ, 135^\circ), \\ S_2 = 2I(45^\circ, 45^\circ) - I(0^\circ, 45^\circ) - I(0^\circ, 135^\circ), \\ S_3 = I(0^\circ, 135^\circ) - I(0^\circ, 45^\circ), \end{cases} \quad (7)$$

由(7)式不难发现,采用 4 组 $1/4$ 波片与起偏器的角度组合,分别测出通过该组合的能量,通过相对简单的算法即可得出偏振光的 4 个斯托克斯参量,考虑到全偏振光的斯托克斯参量的无量纲性,即与被测光束能量无关,可以将偏振光束采用分束器等分为 4 束,分别通过 4 组 $1/4$ 波片与起偏器的组合,采

用 4 个光电二极管同时对从分束器分出的 4 束光进行测量,即可实现在不移动 $1/4$ 波片且不转动起偏器的情况下实时测量偏振光的斯托克斯参量。从(7)式可以得出需要测量的 4 个量分别为 $I(0^\circ, 45^\circ), I(0^\circ, 135^\circ), I(0^\circ, 0^\circ), I(45^\circ, 45^\circ)$,测量系统需要 4 组以上固定偏转角的 $1/4$ 波片与起偏器的组合。

5 实 验

实验采用由发光二极管发出的单色性好的光束经起偏器后变为偏振光,再经过一个 $1/4$ 波片可以变为椭圆偏振光,当驱动 $1/4$ 波片旋转任意角度时,就可以得到一任意偏振态的偏振光(线偏振光、椭圆偏振光、圆偏振光)。

采用 $1/4$ 功率分束器将光束 4 等分,光电转换装置采用光电二极管阵列,测得 $I(0^\circ, 45^\circ), I(0^\circ, 135^\circ), I(0^\circ, 0^\circ), I(45^\circ, 45^\circ)$ 后采用高速数据采集卡采集所需数据后输入计算机进行后续处理,最后将数据代入(7)式,分别解得 S_0, S_1, S_2, S_3 后将求得的数据归一化处理,得出偏振光每一时刻的斯托克斯参量值,并在计算机上以庞加莱球的方式显示。

测量方案如图 1 所示。测量过程中调整完毕并固定起偏器的角度,采用计算机通过 RS-232 接口控制步进电机驱动 $1/4$ 波片平滑转动,从而产生偏振态不断变化的偏振光。

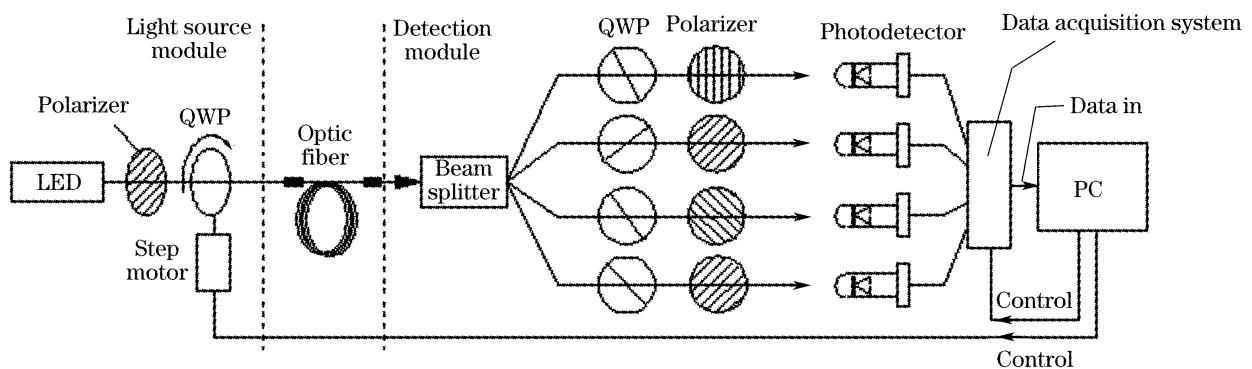


图 1 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic of experimental equipment. QWP: quarter waveplate

数据采集系统同时采集 4 个通道的偏振光能量信号,测得结果代入(7)式得出该时刻的斯托克斯参量,将这 4 个参量归一化处理后显示在庞加莱球的球面上。庞加莱球以及偏振态轨迹的处理采用 OpenGL 函数生成,编程控制每一个测得的数据点在庞加莱球上的显示具有一定延时,从而使得变化的偏振态点在庞加莱球面上产生运行轨迹,调整延

时的长度以便对被测光波的偏振态变化特性进行观测,图 2 为实验装置所测出的实时变化的偏振态在庞加莱球上扫过的轨迹。

控制软件中插入计数模块,记录下了系统的测量速度达到每秒测量 700 个以上的偏振态,实现了偏振态的高速测量。该系统采用多通道测量去除了光学元件的机械运动,能够同时测得偏振光的 4 个

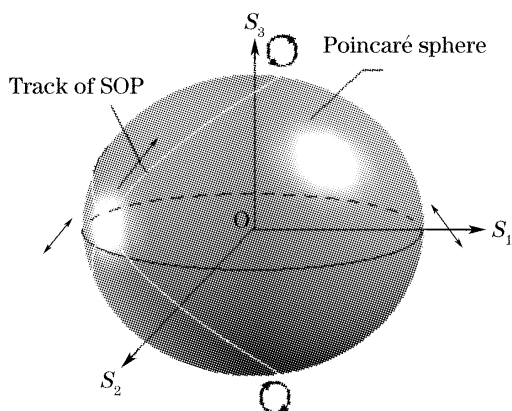


图 2 偏振态在庞加莱球上的轨迹

Fig. 2 Track of state of polarization on Poincaré sphere
SOP: state of polarization

斯托克斯参量,从而大大提高了偏振态的测量速度,影响该系统的测量速度的因素主要以电子线路的性能有关,因而对于测量的速度还有较大的改进空间,影响因素主要为:数-模转换的效率;数据采集卡的采集频率;数据处理的速度;各个元器件的时延。

停止步进电机的运行,让 1/4 波片停止转动以提供偏振态不变的偏振光,对这些状态下的入射光进行多次的斯托克斯参量测量,进而验证系统的重复性。实验中已经过归一化处理的系统读数结果如表 1 所示。

表 1 系统重复性实验数据

Table 1 Experimental data of system repeatability

One position of quarter wave plate				
	S_0	S_1	S_2	S_3
1	1.000	0.638	0.481	-0.601
2	1.000	0.636	0.482	-0.600
3	1.000	0.638	0.482	-0.600
4	1.000	0.637	0.481	-0.599
5	1.000	0.639	0.480	-0.601
Another position of quarter wave plate				
	S_0	S_1	S_2	S_3
1	1.000	0.128	-0.334	-0.933
2	1.000	0.128	-0.332	-0.934
3	1.000	0.126	-0.332	-0.934
4	1.000	0.129	-0.333	-0.931
5	1.000	0.127	-0.333	-0.932

表 1 的结果说明,在某一偏振态下进行多次测量,偏振光的 4 个斯托克斯参量并没有较大的波动,

这一特性使得该系统能够较好地满足测量重复性的要求。

6 结 论

针对光学偏振态测量高速化的需求,对常规的偏振态测量理论进行了相应的延伸,并建立了以表征偏振态的 S_0, S_1, S_2, S_3 与光电探测器测得能量方程 $I(\theta_p, \theta_q)$,发现计算所得光波的斯托克斯参量在经过归一化处理后与入射光波的能量强弱无关,从而可实现多通道同时测量光波的 4 个斯托克斯参量,将入射光等分为 4 束并采用固定角度组合起偏器与 1/4 波片代替常规方法中的一组需要旋转的起偏器与 1/4 波片组合,推导出了适合高速测量偏振态的方法以及相应的计算公式,设计了基于多通道数据采集的高速实时测量偏振态的实验装置以及方法,并编写相应的控制与算法软件。经过测试,该系统的测量速度达到了每秒 700 次偏振态测量,分析发现测量速度主要由系统电子线路性能决定,因此提高数据采集速度、减少系统各个模块的延时以及改良系统算法后测量速度还将有较大的提升空间,对今后我国偏振态高速测量技术有一定的意义。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Lothar B. Moeller, Paul Stephen Westbrook. *Method and Apparatus for Polarization Measurements* [P]. United States, Patent, 6941081B2, 2005-09-06
- 3 Rasheed M. A. Azzam. *Photo Detector Arrangement for Measuring the State of Polarization of Light* [P]., United states, Patent, 4725145, 1988-02-16
- 4 Liu Haitao, Wu Chongqing, Dong Hui *et al.*. Study of measuring polarization state in optical fiber [J]. *J. Northern Jiaotong University*, 2003, 27(3): 58~62 (in Chinese)
刘海涛,吴重庆,董 晖等. 光纤偏振态检测方法的研究[J]. 北方交通大学学报, 2003, 27(3): 58~62
- 5 Gong Yandong, Guan Yali, Jian Shuisheng. Measurement of polarization mode dispersion in fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(6): 731~736 (in Chinese)
龚岩栋,关雅莉,简水生. 光纤偏振模色散的测量[J]. 光学学报, 1997, 17(6): 731~736
- 6 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, 2000
- 7 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