

文章编号: 1001-3806(2007)06-0663-02

波片位相延迟测量的双 $\lambda/4$ 波片法

王 兰, 李国华*, 孔 超, 贾 朋

(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165)

摘要: 在对波片延迟量的测量中常因光源起伏影响测量精度, 出现较大的测量误差, 为了避开光源强度起伏的影响, 提高系统的测量精度, 减小测量误差, 用两个标准 $\lambda/4$ 波片与待测波片组合, 使其满足一定条件等效为旋光器, 搭建了一套测量系统, 用角度测量替代对光强的直接测量。实验结果表明, 该系统可有效避免光源强度起伏对测量结果的影响, 测量精度可达 0.5° 。与传统测量方法相比, 该测量系统具有构造简单, 不受光源起伏影响, 以及测量精度高等特点, 是一种便捷有效的测量方法。

关键词: 激光技术; 偏振光; 波片; 位相延迟

中图分类号: O432.2 文献标识码: A

Phase retardation measurement with two $\lambda/4$ wave plates

WANG Lan, LI Guo-hua, KONG Chao, JIA Peng

(Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract In the retardation measurement of wave plate, the accuracy is often influenced by the fluctuation of the light source. If the fluctuation of the light intensity is avoided, the measurement system will become simple, and the measurement accuracy will be improved. A new measurement system with a polarization apparatus was built, which is composed of two $\lambda/4$ wave plates and the measured wave plate. In the system, angle measurement substitutes direct light intensity measurement, which can effectively avoid fluctuation of the light intensity. The measurement accuracy can reach 0.5° . Compared with traditional measurement methods, it is a handy method with simpler system and higher accuracy.

Key words laser technique; polarized light; wave plate; phase retardation

引 言

延迟器件在偏光技术和光学系统中是常用的光学部件, 例如, 在椭偏法测量或相移干涉测量中, 需要波片对偏振光的偏振状态进行调制。波片的位相延迟作为它的主要技术参数, 对于系统的精度等技术参数有着非常重要的影响。对波片延迟量的测量, 现有的测量技术和方法有很多种^[1~9], 有一些过于复杂, 甚至需要引入补偿片、光电调制等, 有一些方法只能用于测量 $\lambda/4$ 波片。

传统测量方法的主要缺点在于它们都要求对光强进行准确的测量。由于实验过程中有各种因素, 如光源的起伏, 光电探测器的动态范围、本底电流等, 对用测量光强来确定波片的延迟量无疑会直接影响测量精度, 而且测量复杂, 测量过程费时费力。

作者提出了一种新的测量波片位相延迟的方法,

作者简介: 王 兰 (1983-), 女, 硕士研究生, 现从事偏振光学研究。

* 通讯联系人。 E-mail: gh1@163.com

收稿日期: 2006-08-28 收到修改稿日期: 2006-11-14

利用两个 $\lambda/4$ 波片和待测波片共同组成一个等效旋光器, 通过线偏光偏振面旋转角度的测量间接得到待测波片的位相延迟, 对比传统的测量方法, 使用的测量设备少, 避免了光强起伏对测量的影响, 不仅提高了测量精度, 而且测量过程也得到简化。

1 测量原理

波片组合满足一定条件时可以等效为旋光器, 旋光角度与波片的位相延迟量有一定的关系, 因此可以通过旋光角度的测量间接得到波片的位相延迟量。

根据偏振光学中的琼斯矩阵描述, 一组波片和旋光器组合而成的偏光系统等效于经过一个波片及一个旋光器; 也可以看成是先经过一个旋光器, 再经过一个波片^[10]: $M = R(-\omega) \cdot R(-\Omega) J(\varphi) R(\Omega)$, 其中, $R(-\omega)$ 表示旋光器作用矩阵; $R(-\Omega) J(\varphi) R(\Omega)$ 表示波片作用矩阵。如果上述组合系统等效波片部分是一个全波片, 即 $R(-\Omega) J(\varphi) R(\Omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 这个系

统组合就等效一个纯旋光器。这时要求这组波片作用矩阵中元素的虚部为 0。设延迟量分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$

的三波片, 它们的快轴与 x 轴的夹角分别为 α_1 ($\alpha_1 = 0$), α_2, α_3 , 其等效为纯旋光器的条件为:

$$\begin{aligned} &\cos\frac{\varphi_3}{2}\cos\frac{\varphi_2}{2}\sin\frac{\varphi_1}{2} + \cos\frac{\varphi_2}{2}\cos\frac{\varphi_1}{2}\sin\frac{\varphi_3}{2}\cos 2\alpha_3 + \\ &\cos\frac{\varphi_3}{2}\cos\frac{\varphi_1}{2}\sin\frac{\varphi_2}{2}\cos 2\alpha_2 + \\ &\sin\frac{\varphi_3}{2}\sin\frac{\varphi_2}{2}\sin\frac{\varphi_1}{2}\cos 2(\alpha_3 - \alpha_2) = 0 \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-\cos\frac{\varphi_2}{2}\cos\frac{\varphi_1}{2}\sin\frac{\varphi_3}{2}\sin 2\alpha_3 - \cos\frac{\varphi_3}{2}\cos\frac{\varphi_1}{2}\sin\frac{\varphi_2}{2}\sin 2\alpha_2 + \\ &\sin\frac{\varphi_3}{2}\sin\frac{\varphi_2}{2}\sin\frac{\varphi_1}{2}\sin[2(\alpha_3 - \alpha_2)] = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

一般情况, 旋光角与各个波片的位相差以及它们快轴之间的夹角有关。分析 (1) 式、(2) 式可知: 当 $\varphi_1 = \varphi_3 = \pi/2, \alpha_2 = \pi/4, \alpha_3 = \pi/2$ 时, 不论 φ_2 为何值, 等式恒成立。即当两端的波片为正交的 $\lambda/4$ 波片并且与中间波片快轴成 45° 角时, 3 波片组成一纯旋光器, 它的琼斯矩阵可由 3 个波片的琼斯矩阵相乘得出:

$$\begin{aligned} &\frac{1+i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varphi/2) & i\sin(\varphi/2) \\ i\sin(\varphi/2) & \cos(\varphi/2) \end{bmatrix} \cdot \frac{1+i}{\sqrt{2}} \times \\ &\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi/2) & -\sin(\varphi/2) \\ \sin(\varphi/2) & \cos(\varphi/2) \end{bmatrix} = R(-\varphi/2) \quad (3) \end{aligned}$$

由上式可知, 旋光角只与中间波片位相差有关, 旋光器的旋光角为中间波片位相延迟角的一半:

$$\theta = \varphi/2 \quad (4)$$

2 测量光路设计

测量光路如图 1 所示, 其中, 起偏器和检偏器相互

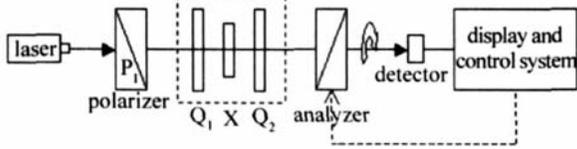


Fig 1 Setup of experiment Q_1, Q_2 -quarter wave plate X-unknown wave plate

正交, 两个 $\lambda/4$ 波片 Q_1, Q_2 的快轴与起偏器 P_1 的透光轴的夹角分别为 45° 和 -45° 。待测波片的快轴 (或慢轴) 与起偏器 P_1 的透光轴重合, 这样两个 $\lambda/4$ 波片和待测波片就等效为纯旋光器, 检偏器通过步进电机控制旋转, 利用灵敏光电探测器判断消光位置, 可精确测量等效旋光器的旋光角, 从而间接得到待测波片的位相延迟量。

测量时, 首先使起偏器和检偏器相互正交, 移去两个 $\lambda/4$ 波片或使两个 $\lambda/4$ 波片快轴转至与起偏器方向一致, 转动待测波片使系统处于消光状态, 这时待测波片的快轴 (或慢轴) 就与起偏器的透光轴重合。然

后使两 λ 波片分别沿顺时针和逆时针转动 45° , 这时, 所有器件都摆放到位, 三者组成为一个旋光器, 系统不再消光, 转动检偏器使系统重新消光, 记录检偏器旋转的角度 θ ($-\pi/2 < \theta < \pi/2$), 由 (4) 式即可计算出待测波片的位相延迟量。

3 实验测试及误差分析

3.1 测试结果

使用上述方法, 对作者所在单位生产的应用波长为 633nm 的标准 $\lambda/4$ 云母波片和 $\lambda/2$ 云母波片进行了测量, 使用的光源为 633nm 的 He-Ne 激光器, 测量温度为 25°C , 测试结果如表 1 和表 2 所示。均方根误差都小于 0.5° , 相对误差不超过 1% 。

Table 1 Measurement result of $\lambda/4$ quartz wave plate

times	1	2	3	4	5
$\theta/(\circ)$	44.05	44.20	43.95	43.80	44.15
$\theta/(\circ)$	88.1	88.4	87.9	87.6	88.3

Table 2 Measurement result of $\lambda/2$ quartz wave plate

times	1	2	3	4	5
$\theta/(\circ)$	89.10	89.35	89.05	89.25	89.45
$\theta/(\circ)$	178.2	178.7	178.1	178.5	178.9

3.2 误差分析

(1) 实际使用的起偏器的消光比可以达到 10^{-6} 量级, 与理想的起偏器消光比为 0 比较, 其引入的误差在测量过程中是可以忽略的。(2) 由于中间 3 个元件等效为一个旋光器, 原则上起偏器和检偏器保持正交可转动到任意位置, 不影响测试精度。所以实验误差主要来源于角度测量误差和消光点的判断误差, 对 $\varphi = 2\theta$ 取微分得: $d\varphi = 2d\theta$ 实验中角度测量精度可达 0.05° , 所以角度测量误差引起的位相延迟误差不超过 0.1° 。为了提高消光点的判断精度, 实验中采用了灵敏光电探测器。消光点的判断误差大约为 0.2° , 考虑到实验中波片快轴的调整和对准可能存在的误差, 本实验延迟量的测量误差不超过 0.5° 。

4 结 论

利用两个 $\lambda/4$ 波片与待测波片组合, 使其满足一定条件等效为一旋光器, 通过旋光角的测量, 从而可得出待测波片的位相延迟, 此方法简便快捷, 避免了传统方法中对光强的直接测量, 消除了光源不稳定对测量结果的影响, 本实验中测量的最大误差小于 0.5° , 重复检测误差也不超过 0.5° 。

区域中露出了河流状的地形,而且西边河面窄,东边河面宽,流水中出现了湍流,水流起伏最大。在原始图像右上方处,显现 3 条锐边的遮盖物看不出是菱形还是什么形状,去云后可以清楚地看到一个梯形状的遮盖物。

在此基础上,程序中采用 1 个 3×3 的高通滤波器,语句是“ $h = \text{fspecial}(\text{'unsharp'});$ ”,滤波器是 $h = [-0.16667, -0.66667, -0.16667; -0.66667, 4.3333, -0.66667; -0.16667, -0.66667, -0.16667]$ 。

对去云后的图像进行尖锐化处理,得到的图像如图 3b 所示。云区域中的河流状地形与梯形状的遮盖物更为清晰,从亮度与对比度乘积^[3]计算值来看,尖锐化前为 3470.9,尖锐化后为 4905.5,可见尖锐后图像得到了加强,就是云边界也得到了加强。

3 讨论

图 1a 由于乌云笼罩,有 1/4 面积上很难获取到信息,图像增强的目的是,想尽办法获取在云区域图像中的信息。前面做的工作是为了尽可能保持有云区域和无云区域边缘上亮度的连续性,来突出云区域中的信息。由于原始图像中,下方的道路是白的,亮度高,而上方偏暗,又要求云区域的亮度不能超过其边缘的亮度值,因此不能将云区域的图像淋漓尽致地表现出来。

作为讨论,就抛开云区域与边界的连续性,对云区域的图像进行拉伸^[4],得到亮度与对比度乘积为 11 893,如图 3c 所示。当第 1 次见到这幅图时,作者豁然开朗,原来在云区域中隐藏着丰富的信息!不再是什么河流状地形,从西向东由窄变宽,而恰恰乌云笼罩的区域中是一个巨大的水坝,水从西面向东面喷流,在图像的左上方明显地可以看出是直角竖直的墙体。

图 3a 图 3b 图 3c 相应的直方图如图 3d 图 3e 图 3f 所示。

4 结论

在遥感图像中,由于云的存在和高大建筑物的阻

挡,本来清晰或者较清晰的图像,使得在阴影区域不容易得到应有的信息。针对信息量有限的图像,想方设法获取应有的信息,这是图像增强技术的永恒的追求。采用非线性拉伸、高通滤波、阴影区域直方图拉伸等方法组合起来使用,能达到意想不到的效果。从本文中的实验结果来看,从云覆盖区域中很容易从墙体、水流来分辨判断出原始图像中云区域中是一个水坝。值得一提的是,非线性样条曲线的高次多项式表示,可以将 PHOTOSHOP、VISIO、MATLAB 等软件组合起来使用,增强后的图像^[5~10]亮度和对比度乘积达到文献[3]中的要求。

参 考 文 献

- [1] HUANG F, ZHOU X, ZHOU Sh D *et al* Adaptive enhancement of object image influenced by cloud and fog [J]. *Infrared and Laser Engineering* 2005, 34(3): 324~327 (in Chinese).
- [2] XIE H M, LIR Y, TIAN X Q *et al* The removing clouds method based on large remote sensing image [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2006 42(1): 42~46 (in Chinese).
- [3] JOHNSON D, I RAHMAN Z, WOODSELL G A. The statistics of visual representation [J]. *SP E*, 2002 4736: 25~35
- [4] CHEN S D, RAMLIA R C. Contrast enhancement using recursive mean-separable histogram equalization for scalable brightness preservation [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(4): 1301~1308
- [5] CHEN F, ZHAO Zh M, YANG J *et al* Cloud shadow removal in high-resolution remote sensing images [J]. *Computer Engineering & Application* 2005, 41(35): 180~182 (in Chinese).
- [6] XIAO Zh J, HUANG J J. Shadow eliminating using edge-fuzzied-retinex in urban colored aerial image [J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis* 2004 9(2): 95~98 (in Chinese).
- [7] JIANG X F, JIN L, TAO Ch K. New method for image fusing based on MSR and edge extraction [J]. *Optoelectronic Engineering* 2006 33(3): 110~113 (in Chinese).
- [8] RUAN Q Q. *Digital image processing* [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2001: 200 (in Chinese).
- [9] YI H Y, LÜ B D, JI Y S. Target recognition under different complicated background of cloud [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(2): 133~137 (in Chinese).
- [10] ZHANG Y X, DU J L, GAO F H *et al*. Chip filtering in fractional Fourier domain and its application in digital image processing [J]. *Laser Technology*, 2003 27(1): 78~80 (in Chinese).

(上接第 664 页)

参 考 文 献

- [1] HAO D Zh, WU F Q. Measurement of phase retardation of wave plate using beam splitting and differential method [J]. *Laser Technology* 2005 29(1): 80~81 (in Chinese).
- [2] YU Ch R. Determination of the phase delay angle of a wave plate with a quarter wave plate [J]. *Laser Technology*, 2003 27(4): 383~384 (in Chinese).
- [3] YAN M, GAO Zh Sh. The simple method research for measuring the phase retardation of wave plates [J]. *Laser Technology*, 2005 29(3): 233~235 (in Chinese).
- [4] YAN M, GAO Zh Sh. Phase shifting method for measuring the phase retardation of wave plates [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser* 2005 16(2): 183~187 (in Chinese).
- [5] XUE Q W, LI G H. Half shade method for measuring the phase retardation of quarter wave plate [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser* 1998 9(2): 150~151 (in Chinese).
- [6] ZHAO Q L, WU F Q. Optical phase retardation measurement by normalized polarizing modulation [J]. *Acta Optica Sinica* 2002, 22(3): 360~362 (in Chinese).
- [7] FAN Sh H, SONG L K, PENG H D *et al*. Two-dimensional measurement for optical phase retardation [J]. *Laser Journal* 2003 24(1): 12~14 (in Chinese).
- [8] YUN M J, LI G H. Phase retardation measurement with $\lambda/4$ wave plate [J]. *Laser Technology*, 2001, 25(5): 328~330 (in Chinese).
- [9] SU M K, SUN M Sh. Phase retardation measurement for wave plates with a beam-splitting prism [J]. *Laser Journal* 1999 20(6): 16~17 (in Chinese).
- [10] WEIG H. *Matrix optics* [M]. 2nd ed, Beijing China Machine Press 1995 156~170 (in Chinese).