

利用偏振干涉成像光谱仪进行偏振探测的新方法 *

简小华¹⁾ 张淳民^{1)†} 祝宝辉¹⁾ 赵葆常²⁾ 杜娟¹⁾

1) 西安交通大学理学院, 西安 710049

2) 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068

(2007 年 8 月 24 日收到 2008 年 8 月 18 日收到修改稿)

以往对干涉成像光谱仪的研究通常仅限于对光的干涉特性的利用, 即由目标干涉图得到其光谱图, 而忽略了其丰富的偏振信息。为了在利用光的干涉特性的同时还充分利用光的偏振特性, 在原有偏振干涉成像光谱仪的基础上, 结合现有的干涉成像光谱技术与偏振探测原理, 提出了一种利用现有偏振干涉成像光谱仪获取探测目标的偏振参数(偏振度、偏振方位角等)的新方法, 并对其精度误差进行了理论分析, 证明了其不但具有较高的稳定性而且具有极高的测量精度。因此, 若把以往的偏振干涉成像光谱仪看作是照相机与光谱仪功能的结合, 则现在可以将之理解为成像仪、光谱仪、偏光仪功能的一体化。这意味着偏振干涉成像光谱仪在目标信息的提取与目标识别方面比以往又多了一种的新手段。

关键词: 偏振探测, 偏振干涉成像光谱仪, Stokes 参量, Savart 偏光镜

PACC: 0760F, 0765, 4225J

1. 引言

干涉成像光谱技术是当今可见光和红外遥感器探测技术的前沿科学, 是成像技术和光谱技术的有机结合, 目前它已成为人们研究和获取目标三维信息(二维空间信息和一维光谱信息)的重要手段和前沿科学^[1-3]。随着航天技术、大规模集成列阵式探测器制作技术以及空间光学、精密机械、计算机图像处理以及数据传输技术的发展, 使成像光谱技术在空间遥感、信息获取等方面越来越显示出其重要的地位和作用, 也更加显示出其在科学研究、国民经济发展及国家安全方面广阔的应用前景。以往对成像光谱仪的研究通常仅限于对光的干涉特性的利用^[4-10], 即由干涉图得到目标的光谱图(色散型成像光谱仪则是直接获得目标特征光谱)而忽略了富含目标特性的偏振信息。事实上, 利用偏振信息进行目标分析、识别等技术正日益广泛地被应用于各个领域。例如, 可根据反射和透射光的偏振特性能获得光介质(如表面粗糙程度等)表面性质, 窥探出光介质

的内部结构和材料特性; 利用介质散射和目标反射光的不同偏振特性可排除粒子散射光的干扰, 从而提高水下图像的清晰度; 利用激光雷达分析云层散射光的偏振特性能遥感大气中各种气溶胶的存在等^[11,12]。为了充分利用光的干涉特性和偏振特性, 我们在结合了现有的偏振干涉成像光谱技术与偏振探测技术原理的基础上, 加以技术上的优化改进, 提出了一种利用现有偏振干涉成像光谱仪获取探测目标的偏振参数(偏振度、偏振方位角等)的新方法。若目标与背景具有不同的偏光性质, 则采用本方法可以有效地把目标从背景中利用偏振特性分离出来, 从而进一步拓展和提升干涉成像光谱仪在目标信息提取与目标识别方面的应用领域和价值。

2. 偏振测量的基本原理

2.1. 偏振态的表示方法

偏振是各种矢量波的一种基本性质, 是指用一矢量波来描述空间某一固定点所观测到的矢量波随

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40537031)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA12Z152)、国防基础科学的研究计划(批准号: A1420080187)、国家自然科学基金(批准号: 40375010, 60278019, A0875013)、陕西省科技攻关计划(批准号: 2001K06-G12, 2005K04-G18)和西安交通大学科研计划资助的课题。

† E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

时间变化的特征,电磁波实质上也是矢量波,光的偏振狭义上是指光波在垂直于其传播方向平面内不同方向上振幅不同的现象,通常用 Stokes 参量来表示^[13,14],

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x^2 + I_y^2 \\ I_x^2 - I_y^2 \\ 2I_x I_y \cos\delta \\ 2I_x I_y \sin\delta \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 I, Q, U, V 四个 Stokes 参量都是光强的时间平均值,具体定义如下: I 表示光的强度,为入射总光强; Q 表示光水平方向的线偏振分量,为水平偏振与垂直偏振之间的强度差; U 表示 45° 方向上的线偏振分量,为光的线偏振分量在 $\pm 45^\circ$ 方向之间的强度差; V 表示光的圆偏振分量,为光的左、右旋圆偏振分量的强度差.与琼斯矢量不同的是,Stokes 矢量可以完全地描述光的偏振状态,并适用于复色光.具体而言,光的偏振度用 Stokes 参量可表示为

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} / I;$$

偏振方位角可表示为

$$\theta = \arctan(U/Q)/2.$$

2.2. 偏振参数的基本测量方法

目前常用的偏振态测量方法如下: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 Stokes 参量,调制方法可以分为偏振片的机械旋转、电光或磁光调制以及四分光同时调制测量等^[15].采用偏振光调制方法的 Stokes 参量检测的通

常方法如下:采用一个 $1/4$ 波片和一个起偏器对光的偏振态 Stokes 参量进行检测.首先不用 $1/4$ 波片,通过在光路中旋转起偏器,得到三个 Stokes 参量 S_0, S_1, S_2 .然后再在光路中插入 $1/4$ 波片,通过旋转 $1/4$ 波片得出最后一个 Stokes 参量 S_3 .通过以上方法可以测得光波的 Stokes 参量为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x + I_y \\ I_x - I_y \\ I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix}. \quad (2)$$

在实际测量过程中由于光的左右圆偏振特性难以准确测量,而且在通常情况下目标的反射光或者目标自身的辐射都是线偏振分量占主要部分^[16],因此只需提取目标的线偏振特性,即 Stokes 矢量中的 I, Q, U 分量,而无需提取圆偏振分量即可有效地进行目标识别.

3. 利用偏振干涉成像光谱仪进行偏振探测

3.1. 偏振干涉成像光谱仪的基本原理

图 1 是我们自行研制的基于双折射晶体(Savart 偏光镜)分光器的时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪的光路图^[17-20]. Savart 板的具体结构如图 2 所示^[19]由两块厚度相等的单轴正(负)晶体组成,前板光轴在 $x-z$ 平面内且与 x, z 轴正向成 45° 角,后板光轴在 $y-z$ 平面内,并与 y, z 轴正向成 45° 角.光源 S 发出的光通过狭缝后经起偏器变为沿偏振片偏振方向振动的线偏振光,入射到 Savart 偏光镜上后发生双折射,成为寻常光(o 光)和非寻常光(e 光)两束线偏振光, o 光沿原入射方向传播, e 光则发生偏折.

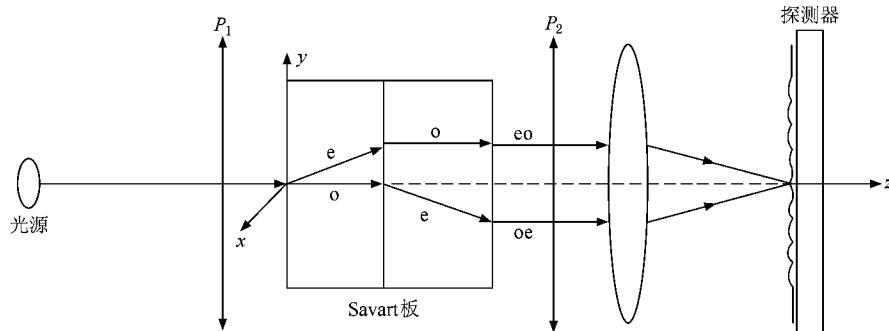


图 1 时空混合调制偏振干涉成像光谱仪原理图

在进入 Savart 偏光镜右板时,由于光轴方向的改变,原 o 光变成 e 光,原 e 光变成 o 光,出射光变成两束有横向剪切量,振动方向互相垂直且平行于原入射光传播方向的线偏振光.经分析器后两束光振动方

向一致,经成像镜后在探测器表面相遇,由于满足相干条件(同频率、同振动方向、有固定的相位差),最终形成干涉图样,此即为干涉成像光谱技术的基础理论.

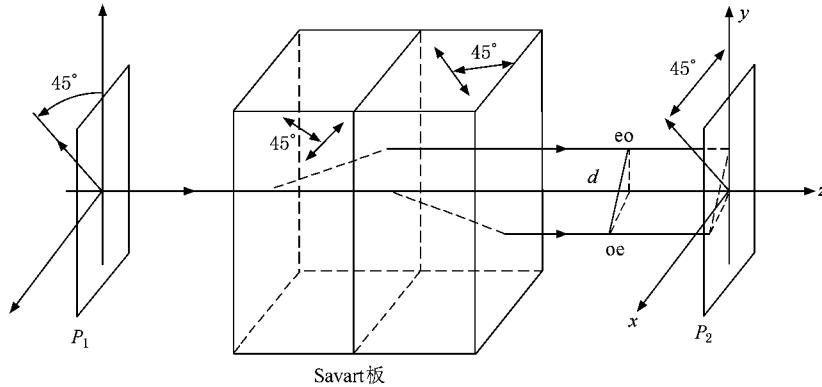


图 2 PSP 空间结构示意图

3.2 可行性分析

用偏振干涉成像光谱仪来测量 Stokes 参量的关键是要看其能否产生与偏振片等同的通光偏振效果.为了分析简便以及从实际应用考虑,我们仅以线偏振光为例.由 Malus 定理易知,当一线偏振光通过一偏振片后的光强表达式为

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \cos^2 \alpha. \quad (3)$$

这里 α 为线偏振光方向与偏振片偏振方向之间的夹角,若假设偏振方向为 45° ,线偏振光的偏振方向与 x 轴成 α 角,则线偏振光通过偏振片后的光强表达式为

$$\begin{aligned} I_{\text{out}} &= I_{\text{in}} \cos^2(45^\circ - \alpha) \\ &= A^2 \cos^2(45^\circ - \alpha). \end{aligned} \quad (4)$$

下面我们分析当一偏振方向与 x 轴成 α 角,振幅为 A 的线偏振光通过偏振干涉成像光谱仪后的光强表达式.通过偏振片 P_1 后的振幅为

$$A_1 = A \cos(45^\circ - \alpha). \quad (5)$$

通过 Savart 板后的振幅为

$$\begin{aligned} A_{\text{oe}} &= A_{\text{eo}} \\ &= A_1 \cos(45^\circ) \\ &= \sqrt{2}(2A_1). \end{aligned} \quad (6)$$

通过偏振片 P_2 后的振幅为

$$\begin{aligned} A_2 &= (A_{\text{oe}} + A_{\text{eo}}) \cos(45^\circ) \\ &= A_1. \end{aligned} \quad (7)$$

由于出射光的振幅

$$\begin{aligned} A_{\text{out}} &= A_2 \\ &= A \cos(45^\circ - \alpha), \end{aligned}$$

所以出射光强

$$\begin{aligned} I_{\text{out}} &= A_{\text{out}}^2 \\ &= A^2 \cos^2(45^\circ - \alpha). \end{aligned}$$

这与通过单一偏振片时的光强变化表达式完全相同,也就意味着可以利用偏振干涉成像光谱仪来进行偏振光的测量.

需要注意的是,上述方法只适用于 Savart 零光程差点的位置,若不然,最终的光强叠加的表达式中将有干涉项的存在,从而也就无法满足偏振光测量的需要.因此偏振干涉成像光谱仪在平行光垂直入射的情况下将达到最充分的利用.

3.3. 实验测量方法

如图 2 所示,将偏振片 P_1 , P_2 和 Savart 板作为一个整体 PSP,通过旋转三次(使偏振片的偏振方向转到 x 轴、 y 轴及 45° 三个方向)获得目标光源三个方向上的偏振强度 I_x , I_y , I_{45° ,通过如下公式即可计算出目标 Stokes 参量 S_0 , S_1 , S_2 :

$$S_0 = I_x + I_y, \quad (8)$$

$$S_1 = I_x - I_y, \quad (9)$$

$$S_2 = 2I_{45^\circ} - S_0. \quad (10)$$

进而可求得目标偏振度

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

这里

$$S_3 = I_R - I_L,$$

其中 I_R 代表目标光源右旋圆偏振光分量, I_L 代表目标光源左旋圆偏振光分量, 可知 S_3 表征的是目标光源圆偏振光的特性参量, 但由于在遥感偏振目标探测识别中 S_3 的数值一般很小^[16], 所以可近似认为是零, 故(11)式可简化为

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}. \quad (12)$$

因此, 结合(8)–(10)、(12)式即可通过测得的 I_x , I_y , I_{45° 来获取目标的偏振度信息, 此即我们利用偏振干涉成像光谱仪测量偏振 Stokes 参量的基本原理.

4. 偏振度误差计算

设入射光为一偏振角度为 θ 、振幅为 A 的线偏

振光, 则通过 PSP 的光强(不考虑晶体吸收、边界反射等系统损耗)为

$$\begin{aligned} I_{45^\circ} &= A^2 \cos^2(\theta - 45^\circ), \\ I_x &= A^2 \cos^2 \theta, \\ I_y &= A^2 \cos^2(\theta - 90^\circ). \end{aligned} \quad (13)$$

利用(12)式可知, 若没有转动误差, 则偏振度为

$$\begin{aligned} P &= [(A^2 \sin^2 \theta - A^2 \cos^2 \theta)^2 + (2A^2 \cos^2(\theta - 45^\circ) \\ &\quad - A^2 \sin^2 \theta - A^2 \cos^2 \theta)^2]^{1/2} A^{-2} \\ &= 1, \end{aligned} \quad (14)$$

即线偏振光的偏振度恒为 1, 这与假设一致.

由于机械控制和工程上的原因, 系统不可避免地会在转动探测中出现一定的转动误差. 现假设在三次转动中的误差分别为 E_1 , E_2 , E_3 , 则

$$\begin{aligned} I'_{45^\circ} &= A^2 \cos^2(\theta - 45^\circ + E_1), \\ I'_x &= A^2 \cos^2(\theta + E_2), \\ I'_y &= A^2 \cos^2(\theta + 90^\circ + E_3). \end{aligned} \quad (15)$$

进而可知偏振度表达式由(14)式转变为

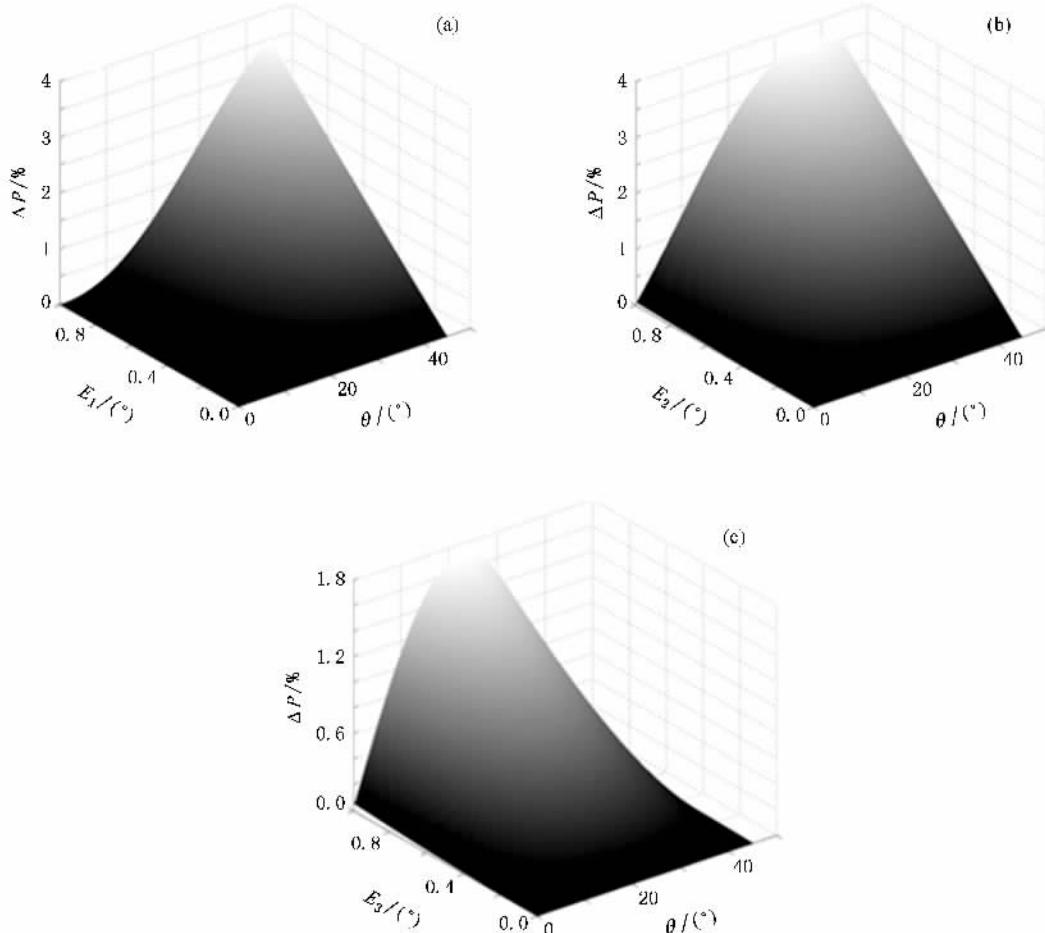


图 3 偏振度误差随入射光偏振方向和转动误差的变化 (a) 转动误差为 E_1 时偏振度误差随入射光偏振方向的变化, (b) 转动误差为 E_2 时偏振度误差随入射光偏振方向的变化 (c) 转动误差为 E_3 时偏振度误差随入射光偏振方向的变化

$$\begin{aligned}
 P' = & [(A^2 \sin^2(\theta - E_3) - A^2 \cos^2(\theta + E_2))^2 \\
 & + (2A^2 \cos^2(\theta - 45^\circ + E_1) - A^2 \sin^2(\theta - E_3) \\
 & - A^2 \cos^2(\theta + E_2))^2]^2 \\
 & \times [A^2 \sin^2(\theta - E_3) + A^2 \cos^2(\theta + E_2)]^1 \quad (16)
 \end{aligned}$$

则偏振度误差

$$\begin{aligned}
 \Delta P = & \frac{P' - P}{P} \\
 = & [A^4 \cos^2 2\theta + (2A^2 \cos^2(\theta - 45^\circ) \\
 & - A^2 \sin^2 \theta - A^2 \cos^2 \theta)^2]^{1/2} A^{-2} \\
 & - [(A^2 \sin^2(\theta - E_3) - A^2 \cos^2(\theta + E_2))^2 \\
 & + (2A^2 \cos^2(\theta - 45^\circ + E_1) - A^2 \sin^2(\theta - E_3) \\
 & - A^2 \cos^2(\theta + E_2))^2]^2 \\
 & \times [A^2 \sin^2(\theta - E_3) \\
 & + A^2 \cos^2(\theta + E_2)]^1. \quad (17)
 \end{aligned}$$

由此可见,偏振度误差不仅仅与转动误差 E_1, E_2, E_3 有关,而且还与目标光源本身的偏振特性有关。为了直观地表现出它们的关系,我们给出了当入射光偏振方向在 0° — 45° 变化时转动误差 E_1, E_2, E_3 与偏振度误差的关系(图 3)。

由图 3 易知,为满足 0.1% 的探测精度要求转动误差至少达到小于 0.03° 及以上精度,而目前旋转平移台的角度精度已达到 0.001° ,故完全可以满足

此精度的要求。

5. 结 论

利用偏振干涉成像光谱仪进行偏振探测,这一方法将偏振测量与干涉成像光谱技术相结合,一方面能提供辐射测量不能提供的物质的偏振信息,另一方面又可获取目标的空间图像和光谱,具有比辐射测量更高的准确度。这种方法具有多种用途,例如可为地球资源的遥感和军事目标微弱信号的检测等提供新的有效手段,为云和大气气溶胶的深入研究提供新的信息来源。目前我们已在理论上论证了其可行性和探测方法并进行了初步的误差分析,而这些研究工作对干涉成像光谱技术和偏振探测的理论研究、技术创新、性能改进、应用和工程化都具有一定的理论意义和实际指导意义。利用偏振干涉成像光谱仪进行偏振探测技术,虽然目前仍受限于探测角度范围(当前仅限于主平面内垂直入射的情况),旋转器件的探测方案可能降低系统原有的稳定性等不足,但其高通量、高光谱分辨率、高灵敏度、高信息密度的特点,必将极大地提高干涉成像光谱仪的应用范围,丰富信息提取的多元化。

- [1] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
- [2] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2003 *Opt. Commun.* **227** 221
- [3] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2002 *Opt. Commun.* **203** 21
- [4] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 824 (in Chinese) [简小华、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 824]
- [5] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** 815
- [6] Jian X H, Zhang C M, Sun Y, Wu L 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 643 (in Chinese) [简小华、张淳民、孙尧、吴磊 2007 光学学报 **27** 643]
- [7] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [袁志林、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]
- [8] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2008 *Opt. Commun.* **281** 2424
- [9] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B, Li Y C 2006 *Optik* **117** 265
- [10] Bell R J 1972 *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* (New York: Academic) p10
- [11] Chao N W, Liu W Q, Zhang Y J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 647 (in Chinese) [曹念文、刘文清、张玉钧 2000 物理学报 **49** 647]
- [12] Ruan C J, Pang W N, Gao J F, Shang R C 2002 *Chin. Phys. B* **11** 126
- [13] Damask J N 2005 *Polarization Optics in Telecommunications* (New York: Springer) p52
- [14] Theocaris P S 1979 *Matrix Theory of Photoelasticity* (New York: Springer-Verlag) p18
- [15] Liao Y B 2003 *Polarized Optics* (Beijing: Science Press) p240 (in Chinese) [廖延彪 2003 偏振光学 (北京:科学出版社) 第 240 页]
- [16] Talmage D A, Curran P J 1986 *Int. J. Remote Sens.* **7** 47
- [17] Peng Z H, Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Wu F Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6374 (in Chinese) [彭志红、张淳民、赵葆常、李英才、吴福全 2006 物理学报 **55** 6374]
- [18] Zhang C M, He J 2006 *Opt. Express* **14** 12561
- [19] Ye J Y, Zhang C M, Zhao B C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 67 (in Chinese) [叶剑勇、张淳民、赵葆常 2008 物理学报 **57** 67]
- [20] Zhang C M, Yan X G, Zhao B C 2008 *Opt. Commun.* **281** 2050

Polarization measurement using polarization interference imaging spectrometer^{*}

Jian Xiao-Hua¹⁾ Zhang Chun-Min^{1)†} Zhu Bao-Hui¹⁾ Zhao Bao-Chang²⁾ Du Juan¹⁾

1) School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2) Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China

(Received 24 August 2007; revised manuscript received 18 August 2008)

Abstract

It is a common method to use the interferential characteristics of light to detect the object in the polarization interference imaging spectrometer system, but the polarized characteristics are usually ignored. In this paper, an advanced way, which combines the basic theories of polarization interference imaging spectroscopy and polarization measurement technology, is studied and used to detect the polarization parameters (e.g. degree of polarization, azimuth angle of polarization), and the error is analyzed, which proves that the system is very stable and precise in theory. Now the polarization interference imaging spectrometer can be used not only as cameras and interferometers but also as polaristrobometers, because the polarized characteristics of the light are made good use of to analyse and distinguish the object in a new way.

Keywords: polarization measurement, polarization interference imaging spectrometer, Stokes vectors, Savart polarizing spectacles

PACC: 0760F, 0765, 4225J

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40537031), the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2006AA12Z152), the Basic Scientific Research Program for National Defense of China (Grant No. A1420080187), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40375010, 60278019, 40875013), the Science and Technology Key Program of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2001K06-G12, 2005K04-G18) and the Scientific Research Program of Xi'an Jiaotong University, China.

† E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn