

利用偏振干涉成像光谱仪进行 偏振检测的最佳角度分析^{*}

简小华¹⁾ 张淳民^{1)†} 赵葆常²⁾ 张霖¹⁾ 朱兰艳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 710119)

(2008 年 7 月 20 日收到, 2008 年 8 月 29 日收到修改稿)

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所不能提供的物体偏振信息, 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. 在简要分析了利用偏振干涉成像光谱仪进行偏振检测的理论基础上, 深入研究了偏振检测的方法, 分析比较了目前常用的偏振探测角度 (45° 、 60°) 对偏振度探测的影响. 进一步计算推导出偏振测量的最优探测角度, 将之与以往常用的探测角度进行了分析比较, 证明了此最佳探测角度可以有效地减小偏振误差、提高偏振探测的精度. 这将极大地提高偏振干涉成像光谱仪的应用范围, 为新型偏振干涉成像光谱技术的研究以及仪器研制提供重要的理论依据.

关键词: 偏振检测, 偏振干涉成像光谱仪, 探测角, Savart 偏光镜

PACC: 0760F, 0765, 4225J

1. 引 言

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^[1-7], 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^[8]. 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) 表面信息, 探测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. 为了充分利用光的干涉特性和偏振特性, 我们在结合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^[9-11], 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. 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, 也可为云和大气气溶胶的深入研究提供新的信息来源等多种用途. 目前我们已在理论上论证了其可行性, 并对探测方法进行了初步的误差分析^[12], 虽然目前仍受限于探测角度范围有限 (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, 但其高通量、高灵敏度、高光谱分辨率、高信息密度的特点, 必将极大地拓展干涉成像光谱仪的应用范围, 丰富信息获取的多元化.

为了最大限度地提升偏振干涉成像光谱仪获取偏振信息的可靠性和精确度, 减小偏振探测在实验和工程中对仪器性能要求和环境的限制, 从而进一步拓宽利用偏振干涉成像光谱仪进行偏振检测的应用范围, 本文在简要分析了利用偏振干涉成像光谱仪进行偏振检测的理论基础上, 深入研究了偏振检测的方法, 推导出偏振测量的最优探测角度, 并将之与目前在偏振检测中普遍使用的探测角度 (45° 和 60°) 进行了分析比较, 证明了此最佳探测角度可以

^{*} 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), 国防基础科学研究计划 (批准号: A1420080187), 国家自然科学基金 (批准号: 40875013, A0375010, 60278019), 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.

[†] 通讯联系人. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

有效地减小偏振误差、提高偏振探测的精度,为偏振检测理论研究和实际工作提供了一个最优化探测角度的参考标准。

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的平面内不同方向上的振幅不同的现象,通常用 Stokes 参数表示为^[13,14]

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle I_x^2 + I_y^2 \rangle \\ \langle I_x^2 - I_y^2 \rangle \\ \langle 2I_x I_y \cos \delta \rangle \\ \langle 2I_x I_y \sin \delta \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

这里 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

目前通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 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^[13,15]。偏振光调制方法的 Stokes 参量检测方法通常采用一个 $1/4$ 波片和一个起偏器对光的偏振态的 Stokes 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偏振干涉成像光谱仪的光路图^[17-20]。其中的 Savart 板的具体结构如图 2 所示,由 2 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,成为两束线偏振光:寻常光(o 光)和非寻常光(e 光), o 光沿原入射方向传播, e 光则发生偏折。而在进入 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,此即干涉成像光谱技术的基础理论。

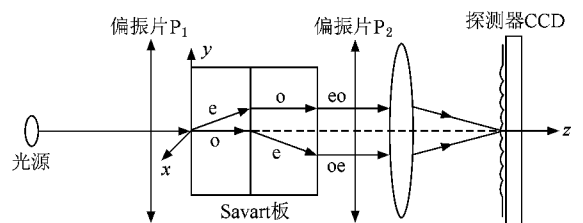


图 1 时空混合调制偏振干涉成像光谱仪原理图

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.由文献 [12] 可知,系统最终的出射光强为 $A_{out} = A_2 = A_1 = A \cos(45^\circ - \alpha)$,所以 $I_{out} = I_{in} \cos^2(45^\circ - \alpha) = A^2 \cos^2(45^\circ - \alpha)$,此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,否则最终的光强叠加的表达式中将有干涉项的存在,从而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.

3.2. 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)获得目标光源在三个方向上的偏振强度参数 I_x, I_y, I_{45° .

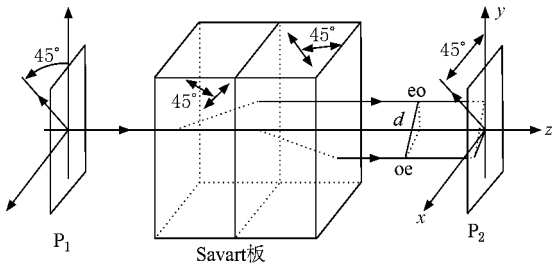


图 2 PSP 空间结构原理图

由偏振参数的基本测量方法可知,目标的三个 Stokes 参量 S_0, S_1, S_2 与强度 I_x, I_y, I_{45° 的关系如下:

$$S_0 = I_x + I_y, \tag{3}$$

$$S_1 = I_x - I_y, \tag{4}$$

$$S_2 = 2I_{45^\circ} - S_0. \tag{5}$$

进而可求得目标偏振度

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \tag{6}$$

式中 $S_3 = I_R - I_L$,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,但在遥感偏振目标探测识别中 S_3 的数值一般很小^[16],可近似认为是零,故(6)式可简化为

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}. \tag{7}$$

结合(3)–(5)(7)式,可通过测得 I_x, I_y, I_{45° 来计算得到目标物的偏振度信息及偏振识别,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.

3.3. 常用偏振探测角度分析比较

目前偏振探测中通常采用的探测角度为 45° 或者 60° .以上述实验方法为例,将偏振片 P_1, P_2 和 Savart 作为一个整体 PSP,旋转角度为 45° ,则通过三次旋转(使偏振片的偏振方向转到 x, y 及 45° 三个方向)获得目标光源在三个方向上的偏振强度参数 I_x, I_y, I_{45° 由(1)式可推得其三个 Stokes 参量分别为

$$S_0 = I_x + I_y, \tag{8}$$

$$S_1 = I_x - I_y, \tag{9}$$

$$S_2 = 2I_{45^\circ} - S_0. \tag{10}$$

若探测角度为 60° ,则上述公式将变为

$$S_0 = \sqrt[3]{I_{0^\circ} + I_{60^\circ} + I_{120^\circ}}, \tag{11}$$

$$S_1 = \sqrt[3]{2I_{0^\circ} - I_{60^\circ} - I_{120^\circ}}, \tag{12}$$

$$S_2 = \sqrt[3]{I_{60^\circ} - I_{120^\circ}}\sqrt{3}. \tag{13}$$

再由(7)式获得目标的偏振度信息.即可通过测得三个强度值来获取目标物的偏振信息,进而用于偏振探测及偏振识别.

由文献 [12] 可知,若没有转动误差,则 45° 与 60° 两探测方案计算所得的偏振度 $P = 1$,这也与假设一致,即线偏振光的偏振度恒为 1.但由于机械控制和工程上的原因,系统不可避免地在转动探测中出现一定的转动误差.现以 45° 方案旋转为例,假设在三次转动中的误差分别为 E_1, E_2, E_3 ,则

$$\begin{aligned} I_{45^\circ} &= A^2 \cos^2(\theta - 45^\circ + E_1), \\ I_x &= A^2 \cos^2(\theta + E_2), \\ I_y &= A^2 \cos^2(\theta + 90^\circ + E_3). \end{aligned} \tag{14}$$

进而可知偏振度表达式由(7)式转变为

$$\begin{aligned} P' &= \left[(A^2 \sin^2(\theta - E_3) - A^2 \cos^2(\theta + E_2))^2 \right. \\ &\quad + (2A^2 \cos^2(\theta - 45^\circ + E_1) - A^2 \sin^2(\theta - E_3) \\ &\quad - A^2 \cos^2(\theta + E_2))^2 \left. \right]^{1/2} \left[A^2 \sin^2(\theta - E_3) \right. \\ &\quad \left. + A^2 \cos^2(\theta + E_2) \right]^{-1}, \end{aligned} \tag{15}$$

则偏振度误差

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

$$\times [A^2 \sin^2(\theta - E_3) + A^2 \cos^2(\theta + E_2)]^{-1}. \quad (16)$$

可见偏振度误差不仅仅与转动误差 E_1, E_2, E_3 有关,且与目标光源本身的偏振特性有关.为了直观地表现出它们之间的直接关系,我们分别给出了入射光偏振方向在 0° — 45° 间变化与转动误差 E_1, E_2, E_3 各自对偏振度误差影响的关系(图 3).

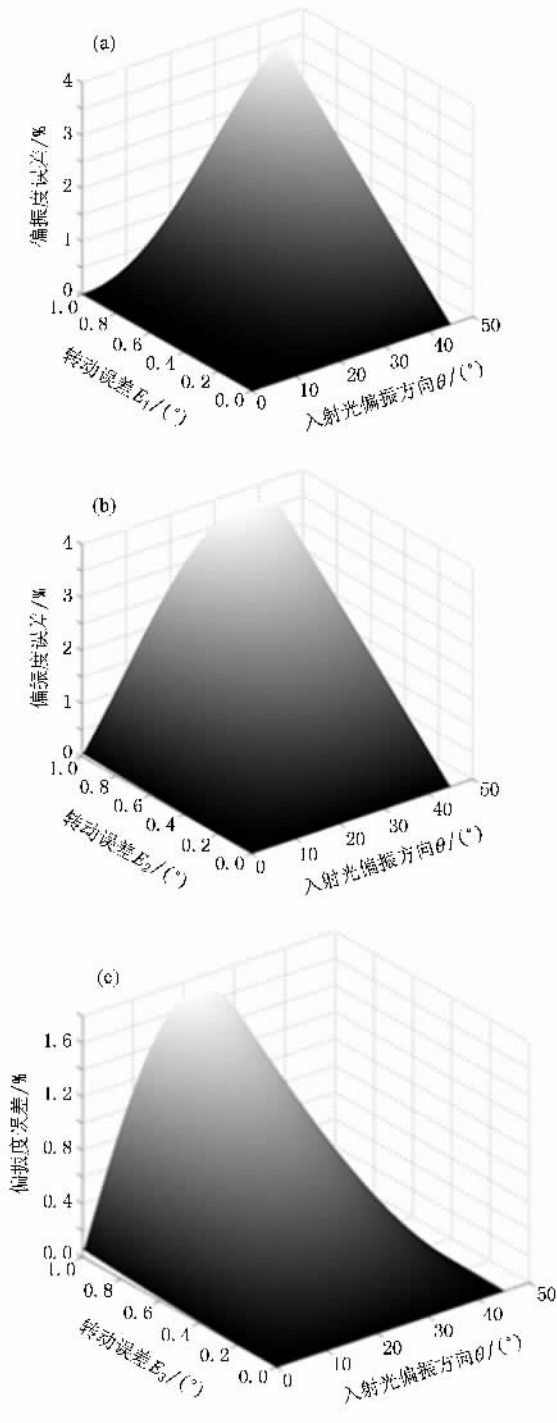


图 3 探测角度为 45° 时偏振度误差随入射光偏振方向与转动误差 E_1, E_2, E_3 的变化关系 (a) E_1 , (b) E_2 , (c) E_3

同理,可计算出在 60° 探测角下的偏振度误差

$$\begin{aligned} \Delta P = \frac{P' - P}{P} = & \left[\left(\frac{4}{3} A^2 \cos^2(\theta - 45^\circ) \right. \right. \\ & - \frac{2}{3} A^2 \cos^2(\theta + 15^\circ) - \frac{2}{3} A^2 \cos^2(\theta + 75^\circ) \Big)^2 \\ & + \frac{1}{3} (2A^2 \cos^2(\theta + 15^\circ) \\ & - 2A^2 \cos^2(\theta + 75^\circ)) \Big]^{1/2} \\ & \times \left[\frac{2}{3} A^2 \cos^2(\theta - 45^\circ) \right. \\ & + \frac{2}{3} A^2 \cos^2(\theta + 15^\circ) \\ & + \frac{2}{3} A^2 \cos^2(\theta + 75^\circ) \Big]^{-1} \\ & - [(\theta - 45^\circ + E_1) \\ & - \frac{2}{3} A^2 \cos^2(\theta + 15^\circ + E_2) \\ & - \frac{2}{3} A^2 \cos^2(\theta + 75^\circ + E_3) \Big)^2 \\ & + \frac{1}{3} (2A^2 \cos^2(\theta + 15^\circ + E_2) \\ & - 2A^2 \cos^2(\theta + 75^\circ + E_3)) \Big]^{1/2} \\ & \times \left[\frac{2}{3} A^2 \cos^2(\theta - 45^\circ + E_1) \right. \\ & + \frac{2}{3} A^2 \cos^2(\theta + 15^\circ + E_2) \\ & + \frac{2}{3} A^2 \cos^2(\theta + 75^\circ + E_3) \Big]^{-1}. \quad (17) \end{aligned}$$

得到的偏振度误差变化特性如图 4 所示.

比较图 3、图 4 可以看出,系统以 45° 旋转探测时偏振度误差线性关系较好,但是以 60° 旋转时则系统误差较小.为了达到 0.1% 的偏振探测精度条件,要求当 45° 旋转时,转动误差需小于 0.015° ($0.9'$); 当 60° 旋转时,转动误差需小于 0.025° ($1.5'$).

图 5 是旋转误差 $E_1 = E_2 = -E_3 = 0.025^\circ$ 时 45° 旋转与 60° 旋转角度下的各自偏振度误差曲线图.由图 5 可知,在绝大部分情况下(入射光的偏振方向大于 12° 时) 60° 旋转的偏振度误差要小于 45° 旋转的偏振度误差.

3.4. 偏振探测角的优化计算

通过以上的计算不难看出,目前偏振探测中普遍采用的 45° 和 60° 探测角度的主要原因是由于这两种情况下测得的光强与 Stokes 参量间的关系比较简单,便于后期计算处理.随着当前计算机技术与信息

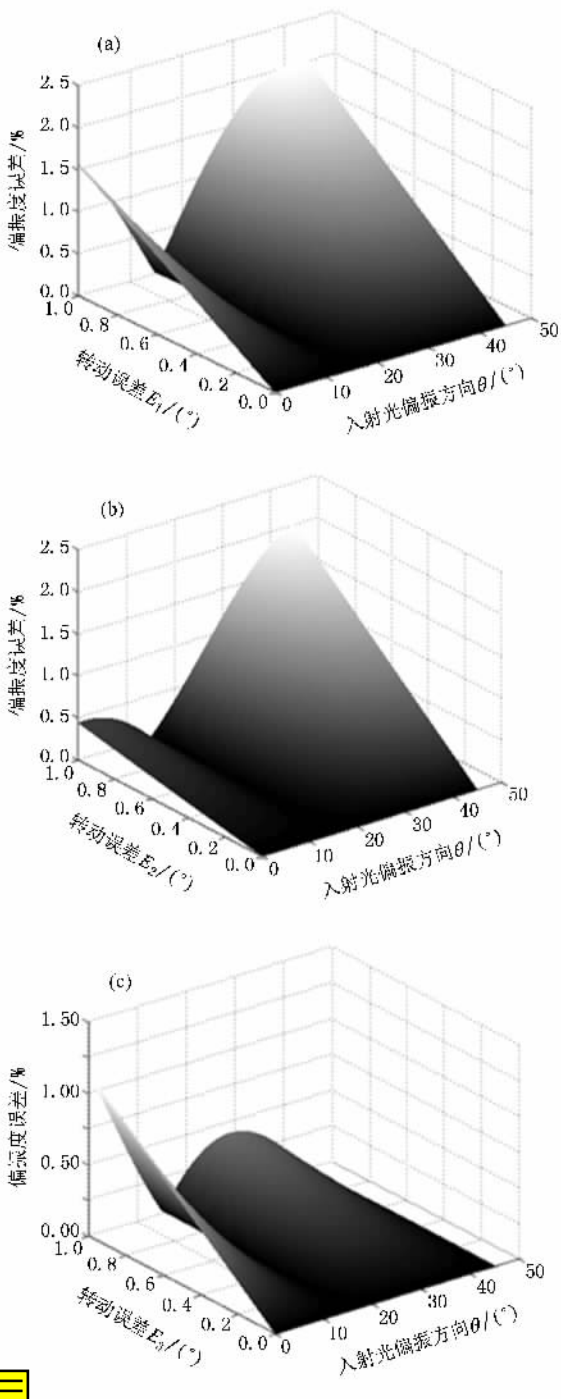


图4 旋转角度为60°时,偏振度误差随入射光偏振方向与转动误差 E_1, E_2, E_3 的变化关系 (a) E_1 , (b) E_2 , (c) E_3

处理技术等相关技术的进步,数据处理已不再是偏振探测中的主要难题,而如何进一步提高偏振探测的精度和准确率则成了限制其进一步发展和应用的关键因素.因此,需要寻找比45°和60°具有更高的精确度和准确率的适用偏振探测角.通过系统的分析与计算,我们最终找到了这一探测角.下面给出具体

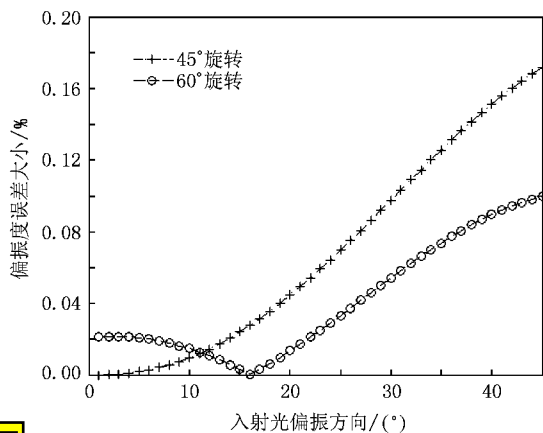


图5 偏振探测角度为45°和60°时的偏振度误差变化曲线比较 旋转误差为0.025°

的推导过程.

由矩阵光学^[14]可知,偏振片的 Muller 矩阵为

$$M_P = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

其中 θ 是偏振片的透振方向与光轴的夹角.因此,当一束光透过偏振片之后,它的 Stokes 参量变化如下:

$$S' = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} S. \quad (19)$$

把 $S' = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}$, $S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}$ 代入(19)式,得到实验测得

的光强与目标光源 Stokes 参量的关系如下:

$$I = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta]. \quad (20)$$

由(20)式可知,为了得到所需目标偏振信息全部的 Stokes 参量,只需在三个不同的方位测量三个不同的光强,即可构建如下方程组:

$$\begin{aligned} 2I_0 &= S_0 + S_1 \cos 2\theta_0 + S_2 \sin 2\theta_0, \\ 2I_1 &= S_0 + S_1 \cos 2\theta_1 + S_2 \sin 2\theta_1, \\ 2I_2 &= S_0 + S_1 \cos 2\theta_2 + S_2 \sin 2\theta_2, \end{aligned} \quad (21)$$

式中 $I_{0,1,2}$ 为对应不同探测方位角 $\theta_{0,1,2}$ 的光强.解方

程组 (21) 可得在三个任意探测角度下的 Stokes 参量 表达式.

$$\begin{aligned} S_0 &= \frac{[I_0 \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) + I_1 \sin(2\theta_2 - 2\theta_0) + I_2 \sin(2\theta_0 - 2\theta_1)]}{4\sin(\theta_0 - \theta_1)\sin(\theta_1 - \theta_2)\sin(\theta_0 - \theta_2)}, \\ S_1 &= \frac{[I_0(\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2) + I_1(\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_0) + I_2(\sin 2\theta_0 - \sin 2\theta_1)]}{4\sin(\theta_0 - \theta_1)\sin(\theta_1 - \theta_2)\sin(\theta_2 - \theta_0)}, \\ S_2 &= \frac{[I_0(\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2) + I_1(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_0) + I_2(\cos 2\theta_0 - \cos 2\theta_1)]}{4\sin(\theta_0 - \theta_1)\sin(\theta_1 - \theta_2)\sin(\theta_2 - \theta_0)}. \end{aligned} \quad (22)$$

考虑到旋转误差的存在 则(22)式可最终表示为

$$\begin{aligned} S_0 &= \frac{[I_{-0} \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) + I_{-1} \sin(2\theta_2 - 2\theta_0) + I_{-2} \sin(2\theta_0 - 2\theta_1)]}{4\sin(\theta_0 - \theta_1)\sin(\theta_1 - \theta_2)\sin(\theta_0 - \theta_2)}, \\ S_1 &= \frac{[I_{-0}(\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2) + I_{-1}(\sin(2\theta_2) - \sin(2\theta_0)) + I_{-2}(\sin(2\theta_0) - \sin(2\theta_1))]}{4\sin(\theta_0 - \theta_1)\sin(\theta_1 - \theta_2)\sin(\theta_2 - \theta_0)}, \\ S_2 &= \frac{[I_{-0}(\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2) + I_{-1}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_0) + I_{-2}(\cos 2\theta_0 - \cos 2\theta_1)]}{4\sin(\theta_0 - \theta_1)\sin(\theta_1 - \theta_2)\sin(\theta_2 - \theta_0)}, \end{aligned} \quad (23)$$

其中

$$\begin{aligned} I_{-0} &= A^2 \cos^2(\theta - \theta_0 + \det 1), \\ I_{-1} &= A^2 \cos^2(\theta - \theta_1 + \det 2), \end{aligned}$$

$$I_{-2} = A^2 \cos^2(\theta - \theta_2 + \det 3).$$

因此,最终得到的偏振度与偏振探测角的关系如下式所示:

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} = \frac{\sqrt{2I_{-0}\sin(\theta_1 - \theta_2) + 2I_{-1}\sin(\theta_2 - \theta_0) + 2I_{-2}\sin(\theta_0 - \theta_1) + A}}{I_{-0}\sin(2\theta_1 - 2\theta_2) + I_{-1}\sin(2\theta_2 - 2\theta_0) + I_{-2}\sin(2\theta_0 - 2\theta_1)}, \quad (24)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= 16 [I_{-0}I_{-1}\sin(\theta_1 - \theta_2)\sin(\theta_0 - \theta_2)\sin^2 \frac{\theta_0 - \theta_1}{2} \\ &+ I_{-0}I_{-2}\sin(\theta_2 - \theta_1)\sin(\theta_0 - \theta_1)\sin^2 \frac{\theta_0 - \theta_2}{2} \\ &+ I_{-1}I_{-2}\sin(\theta_0 - \theta_1)\sin(\theta_0 - \theta_1)\sin^2 \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}]. \end{aligned}$$

图 6 展示了由(24)式确定的不同偏振探测角度下不同偏振方向光线在各典型相同旋转误差情况下的偏振度误差变化曲线.由图 6 易知,虽然在不同探测角度下,计算得到的不同偏振方向偏振光的偏振度误差变化曲线不是唯一的,但在 67.5°探测角附近偏振误差达到极小区域.这里需要指明的是,虽然图中有个别区域针对特定的偏振方向光的偏振度误差为零,但是在这个探测角度下获取的其他偏振方向的偏振光的偏振度误差一般都远远大于 0.1% 的偏振探测精度要求,因此不适宜用来做偏振探测角.以图 6(b)为例,在旋转误差为 1' 的情况下,假设入射光线偏振方向为 35°,当探测角度为 67.5°时它的偏振度误差只有 45°时的一半,是 60°情况下的 60% 左

右.类似的结果也可以由其他各图中得出.因此,不难得出结论,67.5°是比 45°或 60°更适宜的偏振度探测角.

4. 结 论

在简要介绍利用自行研制的基于 Savart 偏光镜的偏振干涉成像光谱仪获取探测目标偏振参数(偏振度、偏振方位角等)新方法的基础上,深入研究了偏振检测的基本方法,比较了目前普遍使用的 45°和 60°探测角对系统偏振度误差的影响,进一步导出了偏振测量的最优探测角度.最佳探测角度的推导计算不仅为新型偏振干涉成像光谱技术和偏振探测技术的研究以及仪器研制、性能改进等提供了重要的理论依据,也将进一步拓展偏振干涉成像光谱仪的应用范围,使之不但能获取目标的二维空间信息和一维光谱信息,同时也能获得目标的偏振信息,从而将偏振干涉成像光谱仪由以往的看作是照相机与光谱仪功能的结合,进一步提升为成像仪、光谱仪、偏光仪功能的一体化,这也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的方法

又多了一种新手段.

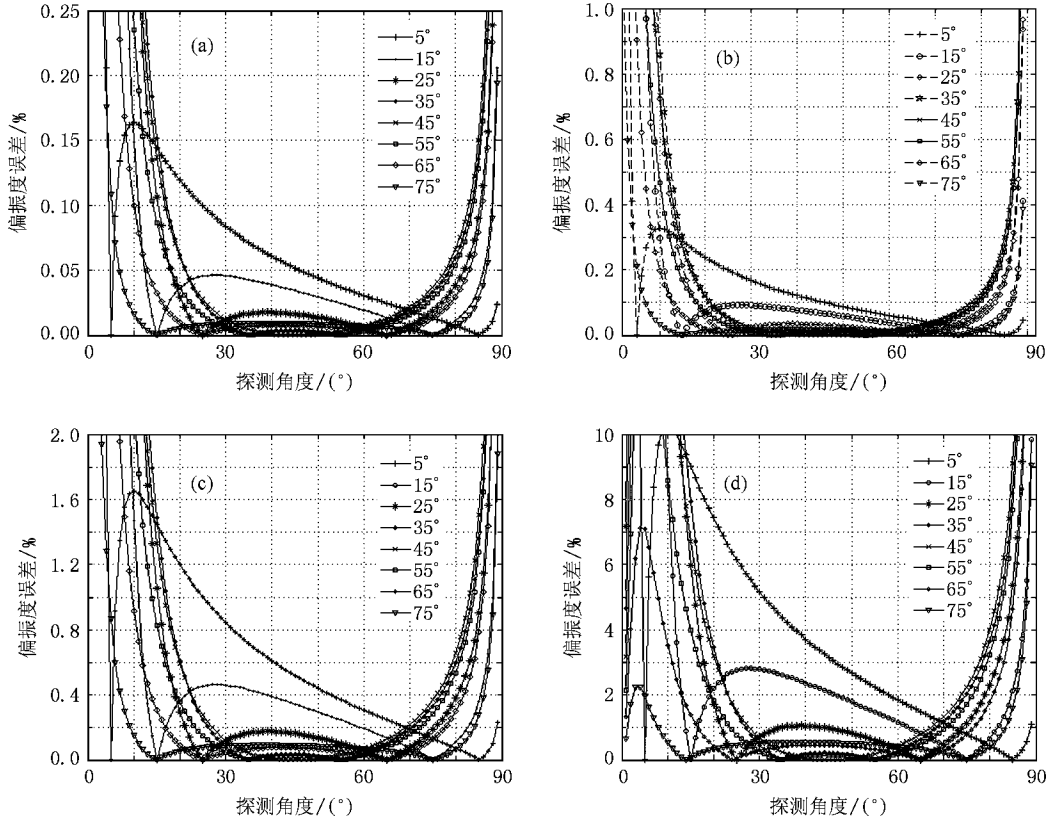


图 6 不同旋转误差下偏振度误差随探测角度的变化曲线 (a) 旋转误差为 $0.5'$ 时的偏振度误差曲线, (b) 旋转误差为 $1'$ 时的偏振度误差曲线 (c) 旋转误差为 $5'$ 时的偏振度误差曲线, (d) 旋转误差为 $30'$ 时的偏振度误差曲线

- [1] 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]
- [2] Zhang C M , Bin X L , Zhao B C 2004 *J. Opt. A* **6** 815
- [3] Jian X H , Zhang C M , Sun Y , Wu L 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 43 (in Chinese) [简小华、张淳民、孙尧、吴磊 2007 光学学报 **27** 43]
- [4] 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]
- [5] Jian X H , Zhang C M , Zhao B C 2008 *Opt. Commun.* **281** 2424
- [6] Zhang C M , Zhao B C , Bin X L , Li Y C 2006 *Optik* **117** 265
- [7] Bell R J 1972 *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* (New York : Academic)
- [8] 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]
- [9] Zhang C M , Zhao B C , Bin X L 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
- [10] Zhang C M , Bin X L , Zhao B C 2003 *Opt. Commun.* **227** 221
- [11] Zhang C M , Bin X L , Zhao B C 2002 *Opt. Commun.* **203** 21
- [12] Jian X H , Zhang C M , Zhu B H , Zhao B C , Du J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7565 (in Chinese) [简小华、张淳民、祝宝辉、赵葆常、杜娟 2008 物理学报 **57** 7565]
- [13] Damask J N 2005 *Polarization Optics in Telecommunications* (New York : Springer-Vevlag)
- [14] Theocaris P S 1979 *Matrix Theory of Photoelasticity* (New York : Springer-Verlag)
- [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 2007 物理学报 **57** 67]
- [20] Zhang C M , Yan X G , Zhao B C 2008 *Opt. Commun.* **281** 2050

The optimization theory of detection angle in polarization measurement using polarization interference imaging spectrometer^{*}

Jian Xiao-Hua¹⁾ Zhang Chun-Min^{1)†} Zhao Bao-Chang²⁾ Zhang Lin¹⁾ Zhu Lan-Yan¹⁾

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 710119 , China)

(Received 20 July 2008 ; revised manuscript received 29 August 2008)

Abstract

The method of measuring the intensity and state of polarization of optical radiation using polarization interference imaging spectrometer (PIIS) combines the basic theories of polarization interference imaging spectroscopy and polarization measurement technology. In this way , the PIIS can be used to detect not only the interference characteristics but also the polarization parameters . Based on the study of polarization measurement , this paper compares the effect of the degree of polarization errors for the conventional detection angles of 45° and 60°. The optimization of detection angle is then discussed , which will lead to a better angle choice for polarization measurements that enables the interference imaging spectrometers to be adapted to almost every field in which the spectroscopy has ventured and able to some where field which has not touched before .

Keywords : polarization measurement , polarization interference imaging spectrometer , detection angle , 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 Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA12Z152) , the Basic Scientific Research Program for the National Defense of China (Grant No. A1420080187) , the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40875013 , 40375010 , 60278019) , 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 .

[†] Corresponding author . E-mail : zcm@mail.xjtu.edu.cn