

可调光程的差分偏振成像系统及其特性研究

王 田, 牛明生*, 步苗苗, 韩培高, 郝殿中, 马丽丽, 宋连科

曲阜师范大学激光研究所山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273165

摘要 基于 Wollaston 棱镜角剪切和 Savart 偏光镜横向剪切组合的可调光程的差分偏振干涉成像光谱系统, 不仅可以同时获取目标正交偏振分量的干涉图和二维空间图, 而且可以通过调整 Savart 偏光镜的厚度, 得到不同光程差下正交偏振分量的干涉图像。该系统的显著特点是正交图像的同时获取和光程的实时改变。描述了可调光程的差分偏振干涉成像光谱系统结构、理论原理, 推导出了干涉强度表达式。详细分析了可调光程的 Savart 偏光镜 (MSP) 和可调光程的宽视场型 Savart 偏光镜 (MWSP) 的光程差及横向剪切量的变化范围。通过两种偏光镜之间的对比可得光程差差别甚微但 MWSP 剪切量较大, 且变化量比 MSP 高 50%。这为以后选择 Savart 偏光镜类型提供了重要依据。

关键词 成像系统; 差分偏振; 偏光干涉; 可调光程 Savart 偏光镜; 横向剪切量

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0711001

Polarization-Difference Imaging System with Adjustable Optical Path and Its Characteristics

Wang Tian, Niu Mingsheng, Bu Miaomiao, Han Peigao, Hao Dianzhong,
Ma Lili, Song Lianke

*Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology,
Laser Institute, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China*

Abstract The polarization-difference interference imaging spectrum system with adjustable optical path based on the combination of the angular shear of Wollaston prism and the lateral shear of Savart polariscope, can not only simultaneously obtain the two-dimensional space image and the interference image in the orthogonal polarization direction of the target, but also obtain the interference image in the orthogonal polarization direction under different optical path differences by adjusting the thickness of Savart polariscope. The features of the system are simultaneous acquisition of orthogonal images and real-time adjustment of optical path. The structure and theoretical principle of the polarization-difference interference imaging spectrum system with adjustable optical path are demonstrated. Expressions for the interference intensity are derived as well. The variation ranges of the optical path difference and the lateral displacement for the modulated Savart polariscope (MSP) and the modulated wide-field-of-view Savart polariscope (MWSP) are analyzed in detail. Through the contrast it is concluded that the optical path difference is little while the lateral displacement of MWSP is 50% higher than that of MSP. The results provide important evidence for the type selection of the Savart polariscope.

Key words imaging systems; polarization difference; polarization interference; modulated Savart polariscope; lateral displacement

OCIS codes 110.5405; 110.3175; 230.1360

收稿日期: 2017-01-13; **收到修改稿日期:** 2017-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(11104160)、曲阜师范大学引进人才科研启动项目(20130760)

作者简介: 王 田(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事偏光技术与应用方面的研究。E-mail: qfnuwangtian@163.com

导师简介: 宋连科(1961—), 男, 本科, 教授, 主要从事偏光技术与应用方面的研究。E-mail: lksong@mail.qfnu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: nmsheng@163.com

1 引 言

成像光谱技术和偏振测量技术是光学遥感中两种重要的技术手段,分别可以获得目标的二维空间图像和一维偏振图像。成像光谱技术与偏振测量技术的有机融合,是近年进行光学探测的新方法,在航空航天^[1]、卫星遥感^[2]、灾害预报^[3]、环境监测^[4]等领域具有广泛的应用。2002年,Zhang等^[5-7]设计了基于Savart偏光镜(SP)的稳态偏振成像光谱仪(SPIIS)和稳态宽视场偏振成像光谱仪(WPIIS)^[8]。SPIIS不仅具有高稳定性、高通量、高信噪比和高灵敏度等性能优点,还具有质量小、体积小、光路紧凑等结构优点。基于Wollaston棱镜(WP)和SP组合的各种偏振干涉成像光谱系统逐渐成为研究热点^[9-10]。

2012年,Mu等^[11-13]设计了一种双通道差分偏振成像光谱仪(PDIIS),可以获取正交偏振分量的光谱图像,且正交偏振光谱图像之和等效于传统光谱图像,正交偏振光谱图像之差等效于差分偏振光谱图像^[14-15]。通过对正交偏振分量光谱图像的处理,可以降低背景影响,提高目标分辨率^[16-17]。但PDIIS的核心部件——SP相对于偏振干涉成像光谱系统(PIIS)中的SP必须旋转 45° ^[11],这给系统搭建带来一定误差,且无法实现系统光程的实时改变,同时对于光谱分辨率和视场问题考虑不全面。

为避免旋转带来的误差,本文提出了一种无需旋转SP的可调光程的差分偏振干涉成像光谱系统(MPDIIS),该系统可以通过移动楔形晶体的位置来调整光程差及剪切量。相比于PDIIS,MPDIIS可以得到不同光程差下正交偏振分量的干涉图像。讨论了MPDIIS的核心部件——可调光程Savart偏光镜(MSP)^[18]和可调光程宽视场型Savart偏光镜(MWSP)。Savart偏光镜厚度固定时,可同时获取正交偏振分量对应的光谱图像,改变Savart偏光镜的厚度时,可以得到不同光程差下正交偏振分量的光谱图像。此系统不仅在偏振干涉成像系统的研制、设计、调试、应用方面具有重要意义,还在理论创新和设计优化等方面具有重要的指导意义和实用前景。

2 差分偏振干涉成像系统

MPDIIS的光学结构如图1所示,Wollaston棱镜的主截面分别为 $x-z$ 平面和 $y-z$ 平面,可将入射光分为两正交线偏振光。用于旋转线偏光振动方向的半波片R,其快轴方向与 x 轴成 -22.5° 夹角。MSP由三块双折射晶体(I和II固定,III可沿斜面移动)构成,晶体I主截面在 $y-z$ 平面内,楔形晶体(II和III)的主截面都在 $x-z$ 平面内,用于产生干涉所需要的光程差。线检偏器(LA)的光轴方向与 x 和 y 正方向的夹角都为 45° ,用于归化干涉所需的振动方向。

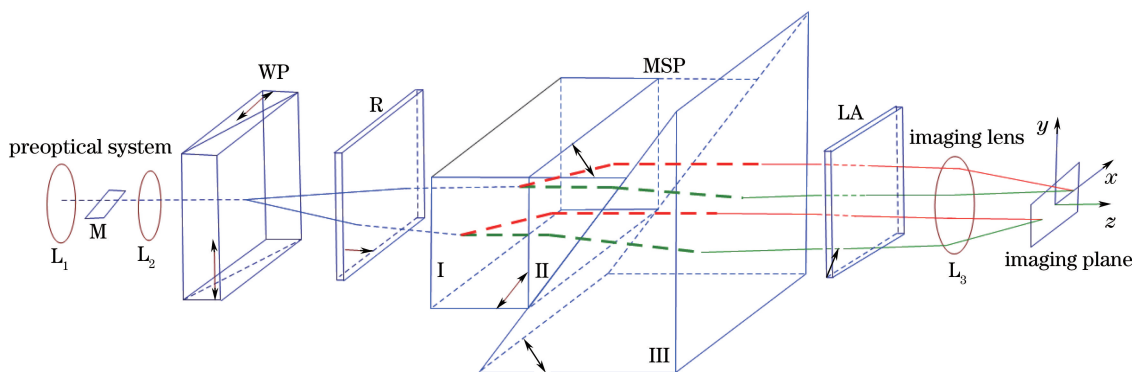


图1 可调光程的差分偏振干涉成像系统的光学结构

Fig. 1 Optical layout of polarization-difference interference imaging system with adjustable optical path

待测光经前置光学系统(L_1, M 和 L_2)准直后进入WP,产生振动方向在 $x-z$ 平面内和垂直于 $x-z$ 平面的正交线偏光 E_x, E_y 。正交线偏光随后通过半波片R,使线偏光振动方向旋转 45° ,进入MSP,两束光经过MSP后分别产生两束正交的线偏光,经LA归化振动方向后,经成像透镜在成像平面上形成关于 $y-z$ 平面对称的干涉条纹 $I_{\parallel}(\Delta, x, y), I_{\perp}(\Delta, x, y)$ 。通过调节MSP的厚度来改变SP分束光的光程差。由于系统双通道光路关于 $y-z$ 平面对称,所以 $I_{\parallel}(\Delta, x, y), I_{\perp}(\Delta, x, y)$ 在系统中产生的光程差完全相等。在测量过程中保持MSP的厚度固定不变,可同时获取正交偏振分量对应的干涉图像,通过傅里叶变换,可以得到待

测物光谱信息和偏振信息。保持视场相对于系统固定不动,沿斜面移动晶体Ⅲ的相对位置,就成为 MPDIIS。

3 偏振干涉成像理论

由图 1 可知,WP 等效于两个正交的偏振器 $\mathbf{J}_{\text{WP1}}(0^\circ)$ 、 $\mathbf{J}_{\text{WP2}}(90^\circ)$ 。MSP 等效于另外两个正交偏振器 $\mathbf{J}_{\text{SP1}}(0^\circ)$ 、 $\mathbf{J}_{\text{MSP1}}(90^\circ)$ 。R 的琼斯矩阵为 $\mathbf{J}_{\text{R}}(-22.5^\circ)$,LA 的琼斯矩阵为 $\mathbf{J}_{\text{LA}}(45^\circ)$ 。 $\mathbf{J}_{\text{WP1}}(0^\circ)$ 、 $\mathbf{J}_{\text{WP2}}(90^\circ)$ 、 $\mathbf{J}_{\text{R}}(-22.5^\circ)$ 、 $\mathbf{J}_{\text{SP1}}(0^\circ)$ 、 $\mathbf{J}_{\text{MSP1}}(90^\circ)$ 、 $\mathbf{J}_{\text{LA}}(45^\circ)$ 分别为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 、 $\frac{i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi) \end{bmatrix}$ 、 $\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 。若入射光的琼斯矢量为 $\mathbf{E}_i = [E_x \ E_y]^T$,T 为转置算符,则 CCD 上接收到的两正交分量的琼斯矢量为

$$\mathbf{E}_{\parallel} = \mathbf{J}_{\text{LA}}(45^\circ) [\mathbf{J}_{\text{SP1}}(0^\circ) + \mathbf{J}_{\text{MSP1}}(90^\circ)\exp(i\varphi)] \mathbf{J}_{\text{R}}(-22.5^\circ) \mathbf{J}_{\text{WP1}}(0^\circ) \mathbf{E}_i, \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_{\perp} = \mathbf{J}_{\text{LA}}(22.5^\circ) [\mathbf{J}_{\text{SP1}}(0^\circ) + \mathbf{J}_{\text{MSP1}}(90^\circ)\exp(i\varphi)] \mathbf{J}_{\text{R}}(-22.5^\circ) \mathbf{J}_{\text{WP2}}(90^\circ) \mathbf{E}_i, \quad (2)$$

式中 $\varphi = 2\pi\Delta/\lambda$ 是两干涉光束之间的相位差。将各偏振元件的琼斯矩阵代入(1)式和(2)式,求出系统出射光的平行分量和垂直分量的复振幅为

$$\mathbf{E}_{\parallel} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi) \end{bmatrix} \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{iE_x [1 - \exp(i\varphi)]}{2\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_{\perp} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi) \end{bmatrix} \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{-iE_y [1 + \exp(i\varphi)]}{2\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其平行分量和垂直分量的干涉图像为

$$I_{\parallel} = \mathbf{E}_{\parallel}^+ \mathbf{E}_{\parallel} = \frac{1}{2} I_x(\sigma)(1 - \cos \varphi), \quad (5)$$

$$I_{\perp} = \mathbf{E}_{\perp}^+ \mathbf{E}_{\perp} = \frac{1}{2} I_y(\sigma)(1 + \cos \varphi), \quad (6)$$

式中 $I_x(\sigma) = \mathbf{E}_x^+ \mathbf{E}_x$ 和 $I_y(\sigma) = \mathbf{E}_y^+ \mathbf{E}_y$ 分别对应入射光的平行和垂直分量的光强信息 \mathbf{E}_{\parallel}^+ 、 \mathbf{E}_{\perp}^+ 分别为 \mathbf{E}_{\parallel} 、 \mathbf{E}_{\perp} 的转置共轭变换, σ 为波数。

对(5)和(6)式分别进行傅里叶变换和图像处理,可反演出正交偏振分量的光谱图像 $I_x(\sigma, x, y)$ 和 $I_y(\sigma, x, y)$,进而推导出传统强度光谱图像、差分偏振光谱图像和偏振度光谱图像分别为^[14]

$$I_{\text{PS}}(\sigma, x, y) = I_x(\sigma, x, y) + I_y(\sigma, x, y), \quad (7)$$

$$I_{\text{PD}}(\sigma, x, y) = I_x(\sigma, x, y) - I_y(\sigma, x, y), \quad (8)$$

$$X_{\text{DOP}}(\sigma, x, y) = \frac{I_{\text{PD}}(\sigma, x, y)}{I_{\text{PS}}(\sigma, x, y)}. \quad (9)$$

与单通道 PIIS 相比,MPDIIS 可获得正交偏振分量的光谱图像和偏振度图像,大大增加了偏振光谱图像信息的获取能力。在目标和背景很难区分的特殊环境下,可以将被测目标从背景光中区分出来。

4 差分偏振干涉成像分析

4.1 MSP 及其调制范围

图 2 为 SP 与 MSP 坐标图,MSP 与 SP 的最大不同是它的第二块晶体变成了两块楔形晶体(Ⅱ和Ⅲ)。随着楔形晶体Ⅲ的相对移动,MSP 的厚度会发生变化,经 Savart 偏光镜分束的正交光线的光程差就随之变化,即变成光程差可调的 Savart 偏光镜。

图 3 为 SP 与 MSP 的截面图,随着可移动楔形晶体上移,o 光与 e 光的光程差逐渐变大。经过晶体 I 产生的光程差为^[18]

$$\Delta_i = t_0 \left\{ \frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{b} + \frac{(a^2 - b^2) \cos \omega \sin i}{2\epsilon^2} + \frac{\sin^2 i}{2} \left[\left(b - \frac{a^2}{\epsilon} \right) \sin^2 \omega + \left(b - \frac{a^2 b^2}{\epsilon} \right) \cos^2 \omega \right] \right\}, \quad (10)$$

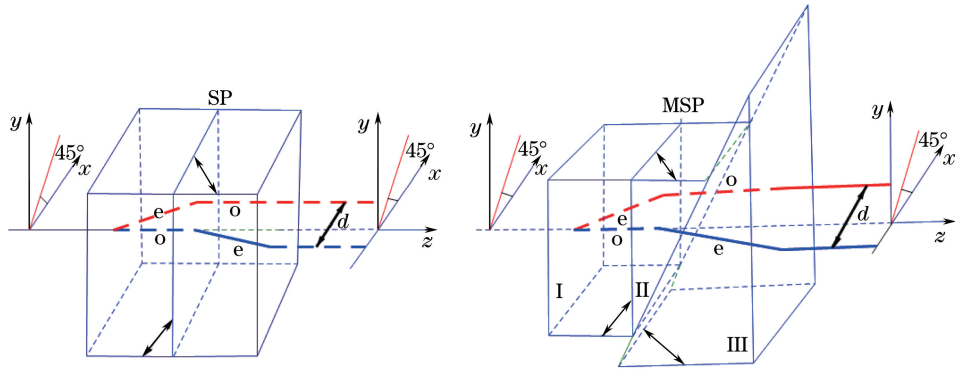


图 2 SP 与 MSP 坐标图

Fig. 2 Coordinate systems of the SP and the MSP

将(10)式中的 ω 用 $\omega + \pi/2$ 代替,则经过楔形晶体 II 和 III 产生的光程差为

$$\Delta_s = (t_0 + s) \left\{ \frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{b} - \frac{(a^2 - b^2) \sin \omega \sin i}{2\epsilon^2} + \frac{\sin^2 i}{2} \left[\left(b - \frac{a^2}{\epsilon} \right) \cos^2 \omega + \left(b - \frac{a^2 b^2}{\epsilon} \right) \sin^2 \omega \right] \right\}, \quad (11)$$

式中 $a = 1/n_e, b = 1/n_o, n_o$ 和 n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率, $\epsilon = \sqrt{(a^2 + b^2)/2}$, ω 为主截面与入射面之间的夹角, $s = L \sin \alpha, L$ 为位移量, α 为楔形结构角。则总的光程差为

$$\Delta_{\text{MSP}} = \Delta_t - \Delta_s, \quad (12)$$

由于入射角较小, $\sin^2 i$ 可以忽略,所以总的光程差为

$$\Delta_{\text{MSP}} = L \sin \alpha \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{\epsilon} \right) + \sin i \left\{ t_0 \frac{(a^2 - b^2)(\sin \omega + \cos \omega)}{(a^2 + b^2)} + L \sin \alpha \left[\frac{(a^2 - b^2) \sin \omega}{2\epsilon^2} \right] \right\}. \quad (13)$$

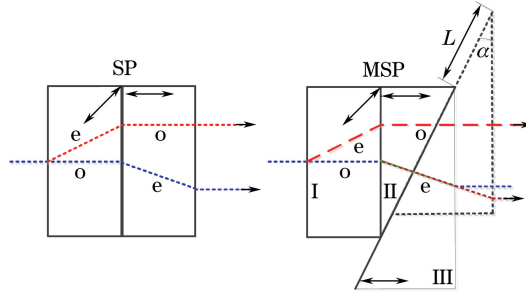


图 3 SP 与 MSP 截面图

Fig. 3 Sections of the SP and the MSP

由图 1 可知, $\omega = \pi/2$, 取 WP 分束角为 $\pi/60$, $t_0 = 6$ mm, $n_o = 1.65835, n_e = 1.48640$ 。则光程差 Δ_{MSP} 随结构角 α 和移动位移 L 的变化如图 4(a) 所示。结构角 $\alpha = \pi/4$ 时, 光程差 Δ_{MSP} 随移动位移 L 的变化如图 4(b) 所示。

由图 3 可知, 随着可移动楔形上移, MSP 的剪切量也逐渐变大。经过晶体 I 产生的横向剪切量为

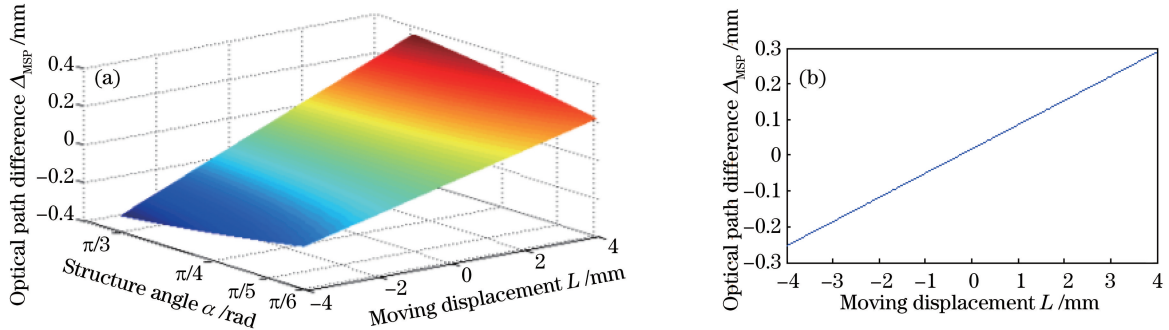


图 4 (a) 光程差随结构角和移动位移 L 的变化图; (b) 光程差随移动位移的变化图

Fig. 4 (a) Change of optical path difference with structure angle and moving displacement;

(b) change of optical path difference with moving displacement

$$d_f = t_0 \left\{ \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} + \sin i \left[\frac{n_o n_e}{(n_o^2 + n_e^2/2)^{3/2}} - \frac{1}{n_o} \right] + \dots \right\} \cos i, \quad (14)$$

经过楔形晶体 II、III 产生的横向剪切量为

$$d_s = (t_0 + s) \left\{ \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} + \sin i \left[\frac{n_o n_e}{(n_o^2 + n_e^2/2)^{3/2}} - \frac{1}{n_o} \right] + \dots \right\} \cos i, \quad (15)$$

总的横向剪切量为

$$d_{MSP} = \sqrt{d_f^2 + d_s^2}. \quad (16)$$

总的横向剪切量 d_{MSP} 随结构角 α 和移动位移 L 的变化如图 5(a) 所示。结构角 $\alpha = \pi/4$ 时, 剪切量 d_{MSP} 随移动位移 L 的变化如图 5(b) 所示。

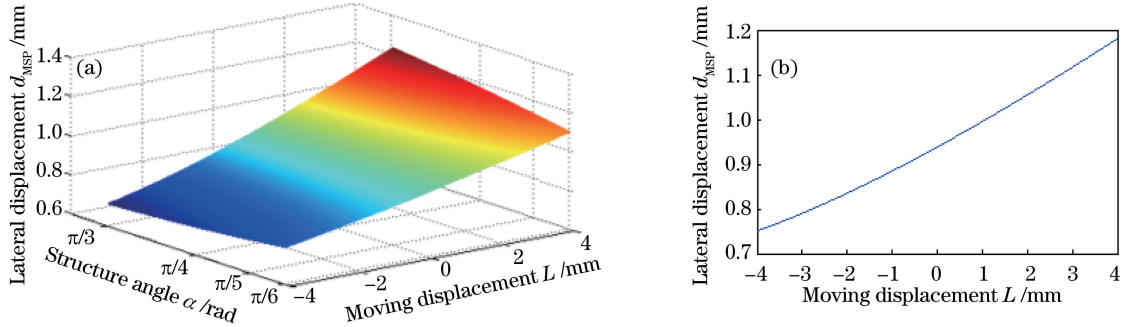


图 5 (a) 剪切量随结构角和移动位移的变化图; (b) 剪切量随移动位移的变化图

Fig. 5 (a) Change of lateral displacement with structure angle and moving displacement;
(b) change of lateral displacement with moving displacement

4.2 MWSP 的调制范围

为了增大 MSP 的视场范围, 降低色散影响, 在 MSP 晶体 I 和 II 之间加上一块与 x 轴成 45° 的补偿型 $\lambda/2$ 波片成为 MWSP, 如图 6 所示。 $\lambda/2$ 波片将经过晶体 I 产生的 o 光和 e 光相位延迟 π , 再进入楔形晶体时 o 光变为 e 光, e 光变为 o 光。将(10)式 ω 用 $\omega + \pi$ 代替, 可得到经过楔形 II 和 III 晶体产生的光程差为

$$\Delta_s = (t_0 + s) \left\{ \frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{b} - \frac{(a^2 - b^2) \cos \omega \sin i}{2\epsilon^2} + \frac{\sin^2 i}{2} \left[\left(b - \frac{a^2}{\epsilon} \right) \sin^2 \omega + \left(b - \frac{a^2 b^2}{\epsilon} \right) \cos^2 \omega \right] \right\}, \quad (17)$$

则 MWSP 总的光程差为

$$\Delta_{MWSP} = \Delta_f - \Delta_s. \quad (18)$$

由于入射角较小, $\sin^2 i$ 可以忽略,

$$\Delta_{MWSP} = L \sin \alpha \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{\epsilon} \right) + \sin i \left\{ 2t_0 \frac{(a^2 - b^2) \cos \omega}{(a^2 + b^2)} + L \sin \alpha \left[\frac{(a^2 - b^2) \cos \omega}{2\epsilon^2} \right] \right\}. \quad (19)$$

由图 1 可知, $\omega = \pi/2$, 取 WP 分束角为 $\pi/60$, $t_0 = 6$ mm, $n_o = 1.65835$, $n_e = 1.48640$, 则光程差 Δ_{MWSP} 随结

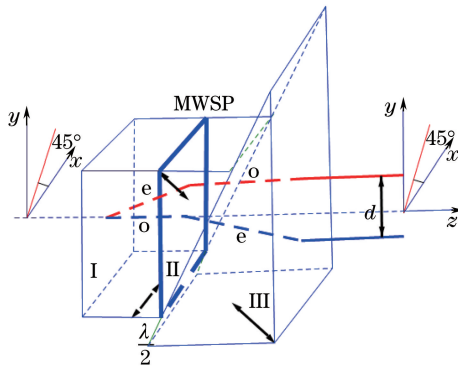


图 6 MWSP 坐标图

Fig. 6 Coordinate system of MWSP

构角 α 和移动位移 L 的变化如图 7(a) 所示。结构角 $\alpha = \pi/4$ 时, 光程差 Δ_{MWSP} 随移动位移 L 的变化如图 7(b) 所示。

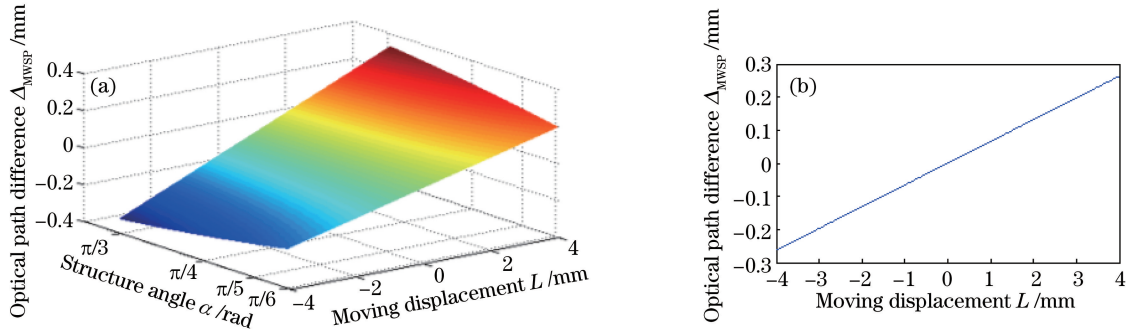


图 7 (a) 光程差随结构角和移动位移的变化图; (b) 光程差随移动位移的变化图

Fig. 7 (a) Change of optical path difference with structure angle and moving displacement;

(b) Change of optical path difference with moving displacement

随着楔形部分上移, MWSP 的剪切量也逐渐变大。MWSP 产生总的横向剪切量为

$$d_{\text{MWSP}} = d_f + d_s = (2t_0 + L \sin \alpha) \left\{ \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} + \sin i \left[\frac{n_o n_e}{(n_o^2 + n_e^2)/2} - \frac{1}{n_o} \right] + \dots \right\} \cos i. \quad (20)$$

剪切量 d_{MWSP} 随结构角 α 和移动位移 L 的变化如图 8(a) 所示。结构角 $\alpha = \pi/4$ 时, 剪切量 d_{MWSP} 随移动位移 L 的变化如图 8(b) 所示。

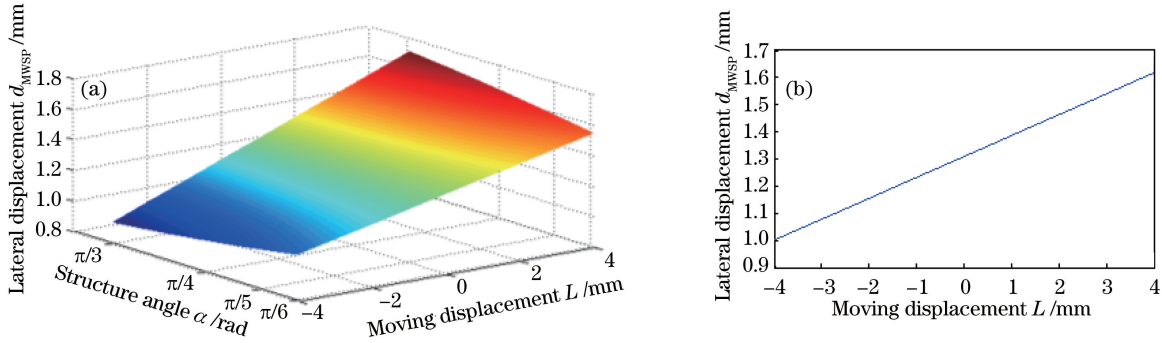


图 8 (a) 剪切量随结构角和移动位移的变化图; (b) 剪切量随移动位移的变化图

Fig. 8 (a) Change of lateral displacement with structure angle and moving displacement;

(b) change of lateral displacement with moving displacement

通过改变 Savart 偏光镜的厚度来改变光程差比通过改变入射角来改变光程差更容易控制, 并且 Savart 偏光镜厚度改变对系统中两通道差分光束的光程改变是相等的。由于光谱分辨率与光程差成反比, 所以在探测不同的目标时, 其光谱分辨率也可以进行有效调节。

4.3 两种设计方式的光程差和剪切量对比

MWSP 与 MSP 光程差、剪切量随楔形晶体移动量的变化如图 9 所示。由图 9(a) 可知, 两种可调节光程的 Savart 偏光镜光程差随楔形晶体移动量的变化不大, 说明这两种 Savart 偏光镜所产生的光程差几乎相等。由图 9(b) 可知, 两种可调节光程的 Savart 偏光镜剪切量随楔形晶体移动量的变化差别较大, MWSP 的剪切量在 1.00 ~ 1.60 mm 之间变化, 变化量达到 0.60 mm, 未加 $\lambda/2$ 波片时 MSP 的剪切量在 0.75 ~ 1.15 mm 之间变化, 变化量达到 0.40 mm。MWSP 剪切量较大且变化量比 MSP 高 50%, 而且 MWSP 随移动位移的增大呈线性增加。这些特性为选择 Savart 偏光镜的类型提供了重要依据。

4.4 系统总光程差

MPDIIS 中每个通道的光经过 Savart 偏光镜后可分成两束光线, 经成像透镜后产生的光程差 $\Delta_i = d \sin i = dx/f$, x 为干涉点相对于零光程点的位置, f 为成像透镜 L_3 的焦距, 等效于双缝干涉, 产生干涉直条纹。可调光程的偏振干涉成像系统产生的干涉条纹为 $y = k \cdot x$ 型且 k 与 MSP 产生的横向剪切量有关。而

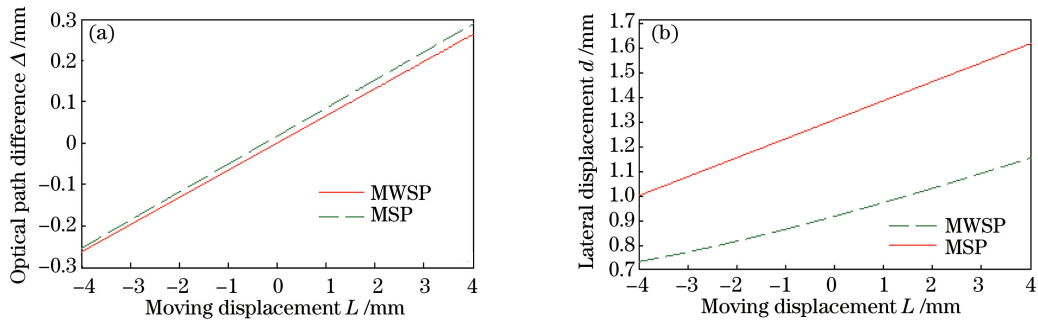


图 9 (a) MWSP 与 MSP 光程差随楔形晶体移动量的变化;(b) MWSP 与 MSP 横向剪切量随楔形晶体移动量的变化

Fig. 9 (a) Change of optical path difference of MWSP and MSP with moving displacement;

(b) Change of lateral displacement of MWSP and MSP with moving displacement

可调光程的宽视场型偏振干涉成像系统产生的干涉条纹为 $y=k$ 型,为平行于 x 轴的直条纹。在 MSP 厚度一定时,系统总的光程差 $\Delta = \Delta_{\text{MSP}} + \Delta_i$ 。光谱分辨率 $\xi = 1/(2\Delta)$,实现光谱分辨率可调。

5 结 论

提出了一种可调光程的双通道差分干涉成像光谱系统,系统的显著特点是正交偏振分量干涉图像的同时获取和系统光程的实时改变,通过测量 MSP 中楔形晶体的相对移动,可得到不同光程差下的干涉图像。对 MPDIIS 进行理论分析,进一步分析了 MSP 和 MWSP 光程差、剪切量随结构角和楔形移动位移的变化,推导出了 MSP 和 MWSP 光程差、剪切量的变化范围。对这两种偏光镜进行对比,得知光程差差别甚微但后者剪切量较大且变化量比前者高 50%,即 MWSP 的视场更大。与单通道 PIIS 相比,该系统增强了差分偏振光谱图像的获取能力。与 PDIIS 相比,该系统具有质量轻、结构紧凑、可动静结合等优点,为偏振干涉成像光谱技术的性能优化提供了一种新思路,具有重要的理论指导意义。

参 考 文 献

- [1] Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Chang Lingying, *et al.* Optical design and on-orbit performance evaluation of the imaging spectrometer for Chang'e-1 lunar satellite[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 479-483.
赵葆常, 杨建峰, 常凌颖, 等. 嫦娥一号卫星成像光谱仪光学系统设计与在轨评估[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 479-483.
- [2] Zhang Chunmin. Interference imaging spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2010: 105-121.
张淳民. 干涉成像光谱技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 105-121.
- [3] Xingli Bin, Wang Zhonghou, Liu Xuebin, *et al.* Hyperspectral imager of the environment and disaster monitoring small satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(3): 257-262.
相里斌, 王忠厚, 刘学斌, 等. “环境与灾害监测预报小卫星”高光谱成像仪[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(3): 257-262.
- [4] Liu Xinjie, Liu Liangyun, Li Xuzhi, *et al.* Comparison on classification results based on date of TG-1 and HJ-1 CCD [J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(3): 74-79.
刘新杰, 刘良云, 李绪志, 等. 天宫一号高光谱成像仪数据与环境星 CCD 数据分类效果比较研究[J]. 遥感信息, 2013, 28(3): 74-79.
- [5] Zhang C, Xiangli B, Zhao B, *et al.* A static polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope[J]. Optics Communications, 2002, 203(1/2): 21-26.
- [6] Zhang C M, Yan X G, Zhao B. A novel model for obtaining interferogram and spectrum based on the temporarily and spatially mixed modulated polarization interference imaging spectrometer[J]. Optics Communications, 2008, 281(8): 2050-2056.
- [7] Zhang C, Li Q, Yan T, *et al.* High throughput static channeled interference imaging spectropolarimeter based on a Savart polariscope[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 23314-23332.
- [8] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B. Wide-field-of-view polarization interference imaging spectrometer [J]. Applied

- Optics, 2004, 43(33): 6090-6094.
- [9] Hu Qiaoyun, Yang Weifeng, Hu Yadong, *et al.* Principle and simulation of a spatially modulated full Stokes parameters polarization imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211004.
胡巧云, 杨伟锋, 胡亚东, 等. 空间调制型全 Stokes 参量偏振成像系统原理及仿真[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211004.
- [10] Liu Jing, Jin Weiqi, Wang Yahui, *et al.* Design of simultaneous imaging polarimetry with double separate Wollaston prism[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0511001.
刘 敬, 金伟其, 王亚慧, 等. 双分离渥拉斯顿棱镜同时偏振成像系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0511001.
- [11] Mu T, Zhang C, Ren W, *et al.* Static polarization-difference interference imaging spectrometer[J]. Optics Letters, 2012, 37(17): 3507-3509.
- [12] Mu Tingkui, Zhang Chunmin, Li Qiwei, *et al.* The polarization-difference interference imaging spectrometer-I. Concept, principle, and operation[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(11): 110704.
穆廷魁, 张淳民, 李祺伟, 等. 差分偏振干涉成像光谱仪 I. 概念原理与操作[J]. 物理学报, 2014, 63(11): 110704.
- [13] Mu Tingkui, Zhang Chunmin, Li Qiwei, *et al.* The polarization-difference interference imaging spectrometer-II. Optical design and analysis[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(11): 110705.
穆廷魁, 张淳民, 李祺伟, 等. 差分偏振干涉成像光谱仪 II. 光学设计与分析[J]. 物理学报. 2014, 63(11): 110705.
- [14] Rowe M P, Pugh E N, Jr, Tyo J S, *et al.* Polarization-difference imaging: a biologically inspired technique for observation through scattering media[J]. Optics Letters, 1995, 20(6): 608-610.
- [15] Tyo J S, Rowe M P, Pugh E N, Jr, *et al.* Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging[J]. Applied Optics, 1996, 35(11): 1855-1870.
- [16] Zhu Y, Shi J, Yang Y, *et al.* Polarization difference ghost imaging[J]. Applied Optics, 2015, 54(6): 1279-1284.
- [17] Bénéière A, Alouini M, Goudail F, *et al.* Design and experimental validation of a snapshot polarization contrast imager [J]. Applied Optics, 2009, 48(30): 5764-5773.
- [18] Mu T, Zhang C, Zhao B. Principle and analysis of a polarization imaging spectrometer[J]. Applied Optics, 2009, 48 (12): 2333-2341.