

基于孔径分割与视场分割的通道型成像光谱偏振技术

权乃承 张淳民 穆廷魁

Channeled spectropolarimetry based on division of aperture and field of view

Quan Nai-Cheng Zhang Chun-Min Mu Ting-Kui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 080703 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.080703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.080703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于声光滤光和液晶相位调谐的高光谱全偏振成像新技术

A new technique of full polarization hyperspectral imaging based on acousto-optic tunable filter and liquid crystal variable retarder

物理学报.2015, 64(14): 140702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140702>

编码孔径成像光谱仪光学系统设计

Optical system design of the coded aperture imaging spectrometer

物理学报.2014, 63(21): 210702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.210702>

差分偏振干涉成像光谱仪 I. 概念原理与操作

The polarization-difference interference imaging spectrometer-I. concept principle and operation

物理学报.2014, 63(11): 110704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110704>

差分偏振干涉成像光谱仪 II. 光学设计与分析

The polarization-difference interference imaging spectrometer-II. optical design and analysis

物理学报.2014, 63(11): 110705 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110705>

一种卫星平台振动光谱成像数据分块校正方法

A sectioned method to correct spectral imaging data degraded by satellite vibrations

物理学报.2014, 63(1): 010701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.010701>

基于孔径分割与视场分割的通道型成像光谱 偏振技术*

权乃承 张淳民† 穆廷魁

(西安交通大学理学院, 空间光学研究所, 西安 710049)

(2015年11月30日收到; 2016年1月13日收到修改稿)

本文基于孔径分割、视场分割与通道光谱技术, 提出一种成像光谱偏振技术的新方案. 本方案在单一面阵探测器上同时获取经过不同强度调制的两对正反相干涉图, 四幅干涉图相加获取强度加倍的目标图像, 正反相干涉图相减获取纯干涉条纹, 纯干涉条纹相加减获取强度加倍的单通道干涉条纹, 对单通道干涉条纹进行傅里叶变换获取目标的光谱与偏振信息. 文中描述了方案的原理结构, 推导出了干涉强度的表达式, 并利用计算机仿真验证了方案的可行性. 为新型成像光谱偏振仪的设计和工程化应用提供了一种新思路.

关键词: 偏振成像光谱技术, 孔径分割, 视场分割, 通道光谱技术

PACS: 07.60.Rd, 07.60.Fs, 42.25.Hz, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.65.080703

1 引言

成像光谱偏振仪 (imaging spectropolarimeter, ISP) 是一种融合了照相机、光谱仪与偏振仪功能的新型探测仪器, 能够同时获取目标的图像、光谱和偏振信息^[1-5]. ISP 将成像光谱仪获取的三维信息 (一维光谱和二维空间) 或者成像偏振仪获取的三维信息 (一维偏振和二维空间) 拓展到了四维 (一维光谱、二维空间和一维偏振信息), 为目标探测和识别提供了更加丰富的信息源, 在军事侦察、伪装识别、地质调查、大气环境监测、农业和海洋遥感等领域将发挥重要作用. ISP 成像光谱偏振仪虽尚处于发展阶段, 但其已引起了国内外相关研究机构的广泛关注^[6-10]. 由于自然界中存在的圆偏振光很少, 获取全部线偏振光谱信息即可满足大多数的应用需求^[6,7]. 受基础原理限制, 传统 ISP 普遍需要狭缝、运动部件以及电控调制相位延迟器, 结构

复杂, 抗振能力及环境适应性差, 很难满足航空航天遥感及野外探测的需求^[11-14]. 静态干涉成像光谱技术的发展为提高 ISP 的性能与实用性提供了新的思路^[15-23]. 基于通道光谱技术与静态干涉成像光谱技术的 ISP 具有实时性好、高稳定性、无电控部件及共光路直线结构等优点, 它利用相位延迟组件对目标的全部偏振信息进行强度调制, 后置静态干涉成像光谱仪获取目标的图像与通道化的干涉图, 通过对干涉图在光程差维进行滤波及傅里叶变换, 便可同时获得目标的全部偏振光谱信息. 但是, 在实际的使用过程中各通道之间会出现不可避免的串扰, 且光程差维的滤波会使各通道对应的光程差减小, 从而导致光谱分辨率的降低^[24-26]. 并且获取的干涉图包含直流项, 直流项一般视为背景噪声, 在复原光谱时需要去除, 否则会降低光谱的信噪比, 而传统去背景方法存在计算量大、光程差零点漂移、对相干光束非等振幅分光误差敏感等缺陷^[27-32].

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2012AA121101)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 41530422)、国家自然科学基金 (批准号: 61540018, 61275184, 61405153)、国家科技重大专项 (批准号: 32-Y30B08-9001-13/15) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20130201120047) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

为了增强传统成像光谱偏振仪的实用性, 在获取四维光学信息的基础上, 提高获取信息的精度、信噪比以及系统的稳定性, 本文提出一种基于孔径分割与视场分割的通道型成像光谱偏振仪 (AFDCISP) 新方案. 入射光依次通过准直系统、消色差的 $\frac{\lambda}{4}$ 波片、延迟器、偏振阵列、消色差的半波片、Wollaston 棱镜、Savart 偏光镜、延迟器、分析器及双透镜组, 在 CCD 上下两侧分别产生两对双通道互补的干涉图, 四幅干涉图相加获取强度加倍的目标图像; 通过干涉图相减获取强度加倍的纯干涉条纹; 纯干涉条纹相加减保留单通道的干涉条纹, 通过傅里叶变换便可获取目标的传统强度光谱与线偏振光谱信息. 本文在详细论述装置组成的基础上, 从系统的原理出发, 通过分析和计算, 推导出了干涉条纹的强度表达式, 并利用计算机仿真验证了方案的可行性.

2 原理方案

2.1 基本原理

AFDCISP 的光学结构如图 1 所示. 消色差的 $\lambda/4$ 波片 AQWP 快轴沿 x 方向, 延迟器 R_1 的快轴与 x 轴的夹角为 45° , 偏振阵列 P_1, P_2 为偏振方向分别平行于 x 轴与 y 轴的起偏器, 这三者组成了光谱调制模块. 消色差的半波片 AHWP 快轴与 x 轴夹角为 22.5° , Wollaston 棱镜 (WP) 的主截面分别平行于 x 轴与 y 轴. Savart 偏光镜左板的光轴位于与 y 轴正向、 z 轴负向成 45° 夹角的平面内, 光轴与 z 轴负向夹角为 45° ; Savart 偏光镜右板的光轴位于

与 y 轴正向、 z 轴正向成 45° 夹角的平面内, 光轴与 z 轴正向夹角为 45° . 延迟器 R_2 的快轴与 x 轴夹角为 45° , 用于产生附加的光程差. 线分析器 (LA) 的偏振方向平行于 x 轴, 用于规化相干所需的透振方向. 面阵 CCD 探测器放置在透镜组 L_{12} 的后焦平面上, 用于接收干涉强度图像.

由目标发出的光线经过 L_0 成像于视场光阑 M 处. 中间像面经过 L_1 准直后通过由 AQWP, R_1 及偏振阵列组成的光谱调制模块, 上光路和下光路的光线变为偏振方向分别沿 x 轴和 y 轴的线偏光 E_{1x} 与 E_{2y} . AHWP 将这两束光的偏振方向沿着 x 轴旋转 45° . E_{1x} 被 WP 竖直角剪切为两束振幅相等且偏振方向正交的线偏光 E_{1x}^x 与 E_{1x}^y , SP 将 E_{1x}^x 横向剪切为振幅相等的正交线偏光, 通过 R_2 产生附加光程差, 再经 LA 规化透振方向, 被 L_1 汇聚在 CCD 的上半部分, 进行干涉并产生干涉图 I_A^i ; E_{1x}^y 被 SP 横向剪切为振幅相等的正交线偏光, 通过 R_2 产生附加光程差, 经 LA 规化透振方向, 被 L_1 汇聚在 CCD 上半部分的下侧, 产生干涉图 I_A^a . 同样, E_{2y} 被 WP 竖直角剪切为两束振幅相等且偏振方向正交的线偏光 E_{2y}^x 与 E_{2y}^y , SP 将 E_{2y}^x 横向剪切为振幅相等的正交线偏光, 经过 LA 规化透振方向, 被 L_2 汇聚在 CCD 的下半部分, 产生干涉图 I_B^i ; E_{2y}^y 被 SP 横向剪切为振幅相等的正交线偏光, 经过 LA 被 L_2 汇聚在 CCD 下半部分的下侧, 产生干涉图 I_B^a . 所获取干涉图像对应像点的光程差在平行于 y 轴方向是相等的, 在平行于 x 轴方向随入射角同步变化. 这四副干涉图相加获取强度加倍的目标图像; I_A^i 与 I_A^a 相减获取强度加倍的纯干涉图 I_A ; I_B^i 与 I_B^a 相减

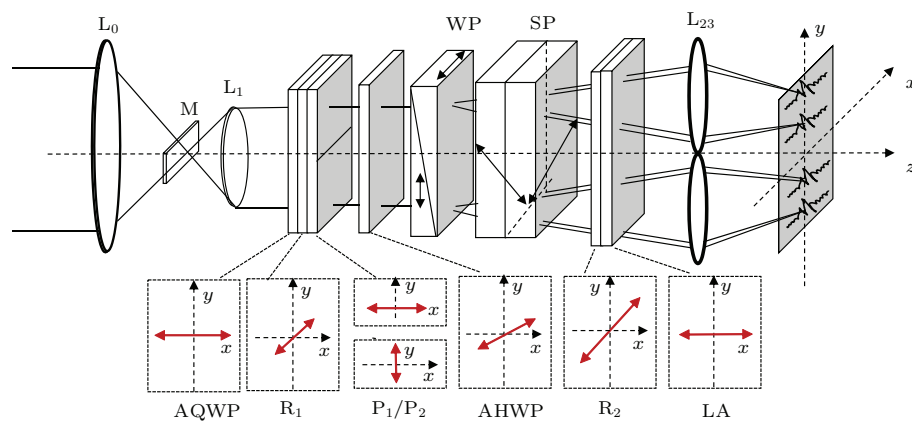


图 1 AFDCISP 光学结构图

Fig. 1. Optical layout of the channeled spectropolarimeter based on division of aperture and field of view.

获取强度加倍的纯干涉图 I_B ; I_A 与 I_B 相加减保留单一通道的干涉条纹, 通过傅里叶变换便可获取目标的线偏振光谱信息. 可见本方案在获取线偏振光谱信息的过程中, 避免了光程差维的通道滤波, 复原的偏振光谱具有高光谱分辨率的优点, 通道间的串扰也不会影响光谱信息获取; 同时, 本方案从硬件上抑制了背景噪声, 有利于提取高信噪比的纯干涉条纹.

2.2 理论推导

从上述 AFDCPIS 结构和工作原理可知, WP 等效为两个正交线偏振器, 其穆勒矩阵分别表示为 $M_{WP}(0^\circ)$, $M_{WP}(90^\circ)$; AQWP, R_1 , P_1 , P_2 , AHWP, SP, R_2 , LA 的穆勒矩阵分别表示为: M_{QW} , M_{R_1} , M_{HW} , $M_P(0^\circ)$, $M_P(90^\circ)$, M_{SP} , M_{R_2} , M_{LA} . 根据偏振光学原理, 空间点 (x, y) 发出光束的 Stokes 矢量 $S(x, y, \lambda)$ 为

$$S(x, y, \lambda) = \begin{bmatrix} S_0(x, y, \lambda) \\ S_1(x, y, \lambda) \\ S_2(x, y, \lambda) \\ S_3(x, y, \lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ}(x, y, \lambda) + I_{90^\circ}(x, y, \lambda) \\ I_{0^\circ}(x, y, \lambda) - I_{90^\circ}(x, y, \lambda) \\ I_{45^\circ}(x, y, \lambda) - I_{135^\circ}(x, y, \lambda) \\ I_R(x, y, \lambda) + I_L(x, y, \lambda) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, S_0 为光束总能量, I_{0° , I_{90° , I_{45° 和 I_{135° 分别表示光束经过 0° , 90° , 45° 和 135° 线偏振片后的强度, I_R 和 I_L 表示光束中的右旋和左旋圆偏振光. 入射 Stokes 矢量 S_{in} 和 I_A^i , I_A^a , I_B^i , I_B^a 对应 Stokes 矢量的关系为

$$S_A^i = M_{LA} M_{R_2} M_{SP} M_{WP}(0^\circ) M_{HW} M_P(0^\circ) \times M_{R_1} M_{QW} S_{in}, \quad (2)$$

$$S_A^a = M_{LA} M_{R_2} M_{SP} M_{WP}(90^\circ) M_{HW} M_P(0^\circ) \times M_{R_1} M_{QW} S_{in}, \quad (3)$$

$$S_B^i = M_{LA} M_{R_2} M_{SP} M_{WP}(0^\circ) M_{HW} M_P(90^\circ) \times M_{R_1} M_{QW} S_{in}, \quad (4)$$

$$S_B^a = M_{LA} M_{R_2} M_{SP} M_{WP}(90^\circ) M_{HW} M_P(90^\circ) \times M_{R_1} M_{QW} S_{in}. \quad (5)$$

在光学手册上查得各元件穆勒矩阵的具体表达式, 代入上式可得:

$$S_A^i = \begin{bmatrix} S_0^a \\ S_1^a \\ S_2^a \\ S_3^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}(1 + \cos \varphi)(S_0 + \cos \phi S_1 + \sin \phi S_2) \\ \frac{1}{4}(1 + \cos \varphi)(S_0 + \cos \phi S_1 + \sin \phi S_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$S_A^a = \begin{bmatrix} S_0^b \\ S_1^b \\ S_2^b \\ S_3^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}(1 - \cos \varphi)(S_0 + \cos \phi S_1 + \sin \phi S_2) \\ \frac{1}{4}(1 - \cos \varphi)(S_0 + \cos \phi S_1 + \sin \phi S_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$S_B^i = \begin{bmatrix} S_0^c \\ S_1^c \\ S_2^c \\ S_3^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}(1 + \cos \varphi)(S_0 - \cos \phi S_1 - \sin \phi S_2) \\ \frac{1}{4}(1 + \cos \varphi)(S_0 - \cos \phi S_1 - \sin \phi S_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$S_B^a = \begin{bmatrix} S_0^d \\ S_1^d \\ S_2^d \\ S_3^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}(1 - \cos \varphi)(S_0 - \cos \phi S_1 - \sin \phi S_2) \\ \frac{1}{4}(1 - \cos \varphi)(S_0 - \cos \phi S_1 - \sin \phi S_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中 φ 为两相干光束之间的相位差, 与光程差 Δ 之间的关系为 $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta_{\text{SP}} + \Delta_{\text{R}_2})$, Δ_{SP} 为 SP 产生的光程差, Δ_{R_2} 为延迟器 R_2 产生的光程差, ϕ 为延迟器 R_1 产生的相位延迟量.

根据偏振光学原理可知, CCD 所能采集到的光信号为总的光强信号, 也即得到的四个干涉强度分别为 S_0^{a} , S_0^{b} , S_0^{c} 与 S_0^{d} [21]:

$$I_{\text{A}}^{\text{i}} = \frac{1}{4}(1 + \cos \varphi) \times (S_0 + \cos \phi S_1 + \sin \phi S_2), \quad (10)$$

$$I_{\text{A}}^{\text{a}} = \frac{1}{4}(1 - \cos \varphi) \times (S_0 + \cos \phi S_1 + \sin \phi S_2), \quad (11)$$

$$I_{\text{B}}^{\text{i}} = \frac{1}{4}(1 + \cos \varphi) \times (S_0 - \cos \phi S_1 - \sin \phi S_2), \quad (12)$$

$$I_{\text{B}}^{\text{a}} = \frac{1}{4}(1 - \cos \varphi) \times (S_0 - \cos \phi S_1 - \sin \phi S_2), \quad (13)$$

这四个干涉强度之和即为目标的图像.

由 (10)—(13) 式可以得到去掉背景的纯干涉强度:

$$I_{\text{A}} = I_{\text{A}}^{\text{i}} - I_{\text{A}}^{\text{a}} = \frac{1}{2}(S_0 + \cos \phi S_1 + \sin \phi S_2) \cos \varphi, \quad (14)$$

$$I_{\text{B}} = I_{\text{B}}^{\text{i}} - I_{\text{B}}^{\text{a}} = \frac{1}{2}(S_0 - \cos \phi S_1 - \sin \phi S_2) \cos \varphi. \quad (15)$$

通过欧拉公式可得:

$$I_{\text{A}} = \cos \varphi \left[\frac{S_0}{2} + \frac{e^{i\phi}}{4}(S_1 - iS_2) + \frac{e^{-i\phi}}{4}(S_1 - iS_2) \right] = C_0 + C_{-1} + C_1, \quad (16)$$

$$I_{\text{B}} = \cos \varphi \left[\frac{S_0}{2} - \frac{e^{i\phi}}{4}(S_1 - iS_2) - \frac{e^{-i\phi}}{4}(S_1 - iS_2) \right] = C_0 - C_{-1} - C_1, \quad (17)$$

其中, $C_0 = \frac{S_0}{2}$, $C_{-1} = \frac{e^{i\phi}}{4}(S_1 - iS_2)$, $C_1 = \frac{e^{-i\phi}}{4}(S_1 - iS_2)$. 可以看出, 干涉图作为载频信号被调制成了以 $0, \phi, -\phi$ 为中心点的三部分. 通过

选择 R_2 所产生的相位, 在整个光程差范围内只保留 C_0, C_1 , 可以得到:

$$I_{\text{A}} = C_0 + C_1, \quad (18)$$

$$I_{\text{B}} = C_0 - C_1. \quad (19)$$

由 (18), (19) 式可得单通道的纯干涉条纹为

$$C_0 = \frac{I_{\text{A}} + I_{\text{B}}}{2}, \quad (20)$$

$$C_1 = \frac{I_{\text{A}} - I_{\text{B}}}{2}. \quad (21)$$

利用傅里叶变换可得:

$$S_0 = 2\text{FT}\{C_0\}, \quad (22)$$

$$S_1 = \text{real}\{4\text{FT}\{C_1\}e^{i\phi}\}, \quad (23)$$

$$S_2 = \text{imag}\{4\text{FT}\{C_1\}e^{i\phi}\}, \quad (24)$$

其中 $\text{FT}\{\cdot\}$ 代表傅里叶变换, $\text{real}\{\cdot\}$ 代表求复数实部, $\text{imag}\{\cdot\}$ 代表求复数虚部.

通过两幅纯干涉条纹的加减运算只保留其中一个通道, 通道之间存在的串扰不影响单通道干涉条纹的获取, 并且该方法避免了光程差维的滤波, 获取的单通道干涉图保留了与整个光学系统相同的光程差, 由 (22)—(24) 式所复原全部线偏振光谱的分辨率就不会下降, 与系统决定的光谱分辨率一致; 由于本系统获取了两对正反相的干涉图, 利用正相与反相干涉图相减的方式提取纯干涉条纹, 克服了传统去背景方法存在计算量大、光程差零点漂移、对相干光束非等振幅分光误差敏感等缺点, 便于提取高信噪比的纯干涉条纹.

3 仿真与分析

此处采用的探测器为 Princeton 公司的 PhotonMAZ:512B 电子倍增 EMCCD, 空间分辨率为 512×512 , 像素大小为 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$, 像素间隔为 $16 \mu\text{m}$. 探测波长范围为 $486\text{--}960 \text{nm}$, 假定目标上某一点处的光谱强度如图 2 所示. 根据奈奎斯特采样定理, 为了避免光谱混叠现象, 则最大采样间隔应为 $\delta\Delta = 1/\sigma_{\text{max}} = 0.243 \mu\text{m}$. 由于一个干涉周期至少要采两个数据点, 为了满足采样要求, CCD 一行相邻两个像元对应的光程差间隔不能大于最大采样间隔. 若相邻像元的光程差间隔刚好等于采样间隔, 则系统的最大光程差为 $\Delta_{\text{max}} = \delta\Delta(N/2) = 62.2 \mu\text{m}$.

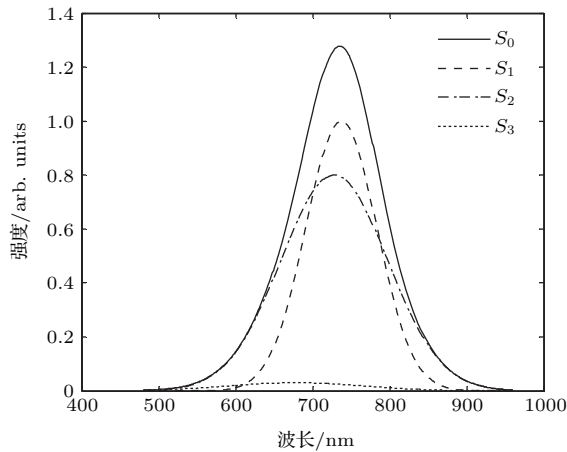


图2 入射的 Stokes 光谱强度
Fig. 2. Input Stokes spectrum.

由偏振光学原理可知, 相位延迟器所产生的光程差可以表示为 $\Delta_R = \Delta n d$ 其中 $\Delta n = n_e - n_o$, 为晶体的双折射率, d 为延迟器的厚度. 根据第二节的分析, 可以得到 CCD 上干涉图的光程差分布如图 3 所示.

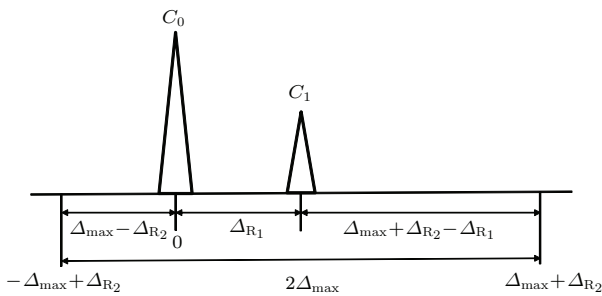


图3 探测器上双通道干涉图的光程差分布
Fig. 3. Distribution of OPD on the detector array.

图中 Δ_{\max} 为系统的最大光程差, Δ_{R_1} , Δ_{R_2} 分别为延迟器 R_1 , R_2 产生的光程差. 由于本方案避免了光程差维的通道滤波, C_0 , C_1 间的串扰不会对复原光谱产生影响. 因此, 该系统对 R_1 , R_2 的厚度没有明确的要求, 仅需要获取的干涉图满足过零采样, 并且使包含完整光谱信息的干涉条纹能够全部出现在 CCD 上即可. 此处选择 Δ_{R_1} , Δ_{R_2} 的值均为 $36 \mu\text{m}$. 采用石英晶体为 R_1 , R_2 的材料, 双折射率 Δn 取为 0.009 (忽略色散), 那么 R_1 , R_2 的厚度均为 4 mm.

WP 和 SP 均采用在整个探测波段范围内具有高透射率的方解石晶体制作. 如果 L_1 , L_2 的焦距为 80 mm, WP 的分束角约为 0.7° 时可以在 y 轴方向上充分利用 CCD 的尺寸, 由此可得 WP 的结构角

为 2° ; 为了能够充分利用 CCD 的光谱分辨率, SP 所产生的剪切量应该为 1.5 mm, 那么 SP 的单板厚度为 6.5 mm.

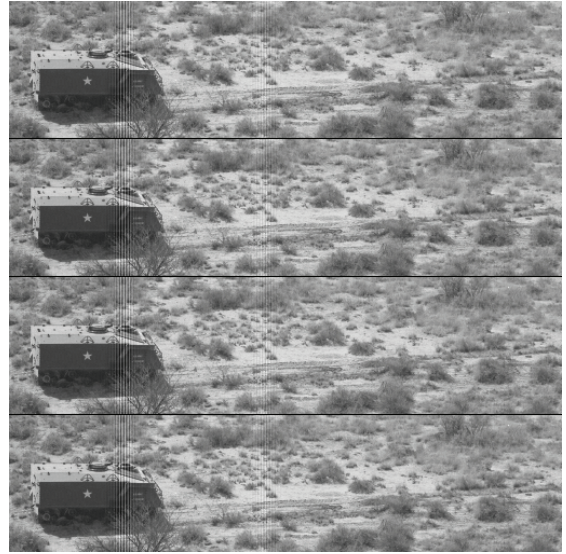


图4 模拟的在探测器上获取的二维干涉图
Fig. 4. Simulated two dimensional interferogram on the detector array.

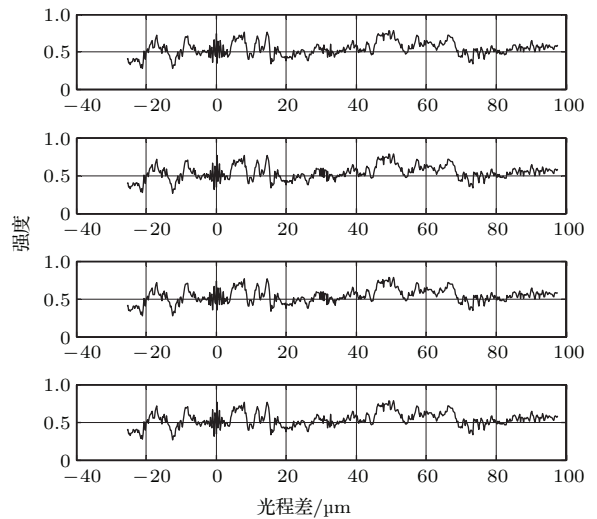


图5 带有背景的一维干涉强度
Fig. 5. One-dimensional interference intensity with background.

图 4 为模拟的在探测器上获取的四幅二维干涉图, 图 5 为每幅二维干涉图第 20 行对应的一维干涉强度. 此图只是所有推扫图像中的某一副, 不包含像元完整的光谱信息. 可以看到在 CCD 上获取的干涉条纹呈双通道分布. 图 6 为通过四幅干涉图相加所获取的目标图像, 干涉强度与图像之间已经完全分离. 图 7 和图 8 为通过干涉图相减所获取的



图6 获取的目标图像
Fig. 6. Image of the target.



图7 二维纯干涉条纹
Fig. 7. Two dimensional pure interference patterns.

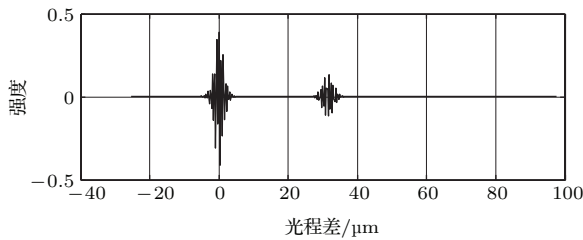
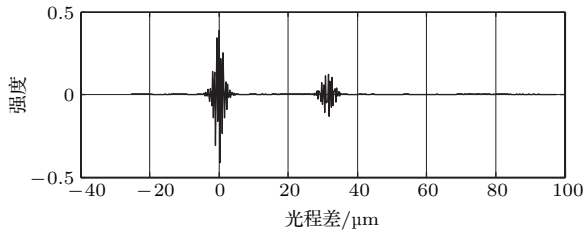


图8 一维纯干涉强度
Fig. 8. One-dimensional pure interference intensity.

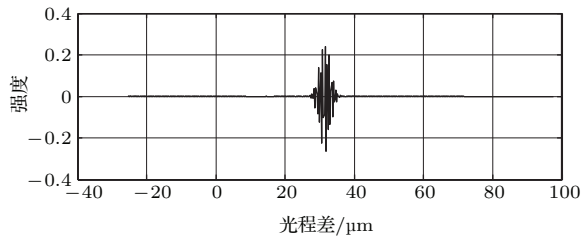
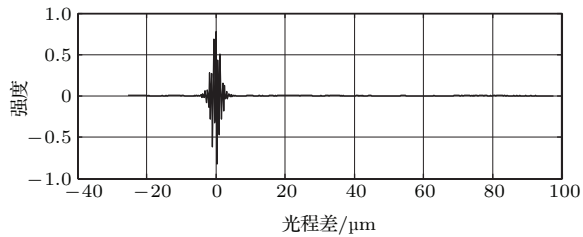


图9 单通道一维纯干涉强度
Fig. 9. Single channeled one-dimensional interference intensity.

纯干涉图及其对应的一维干涉强度,此时背景已经完全去除.图9为获取的单通道纯干涉强度.对所有推扫图像进行上述操作,并对某像元对应纯干涉强度序列进行提取并重新排布,便可获得像元的完整光谱信息^[19].图10为复原的光谱强度,由于没有考虑噪声的影响及CCD像元的响应效率偏差,得到复原光谱与输入光谱保持一致.

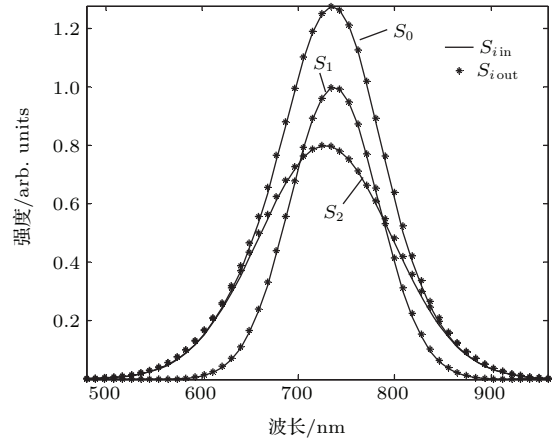


图10 复原的偏振光谱
Fig. 10. Superimposed original spectra (solid lines) and reconstructed spectra (dotted lines).

4 结 论

本文提出了一种静态、可同时获取目标图像、光谱、线偏振信息的成像光谱偏振技术新方案.论述了其结构原理、干涉理论及光谱复原方法.分析了该仪器实现获取目标四维光学信息的工作过程,通过理论推导给出了干涉强度的具体表达式,并通过计算机仿真验证了方案的可行性.

本方案融合了孔径分割、视场分割与通道光谱技术,采用了包含两个偏振方向正交的线偏振器(偏振阵列)的光谱调制模块和由两个透镜构成的透镜组,以及两个偏振分束器:Wollaston棱镜和Savart偏光镜,目的是在单一面阵探测器上同时获取四幅经过不同强度调制的两对正反相干涉图,进而反演出目标的图像、光谱与偏振信息.与传统通道型干涉偏振成像光谱技术相比,该方案从光学结构上避免了图像与干涉条纹之间的影响,通过干涉图间的简单加减运算,便可获得目标的纯图像与纯干涉强度,获取有效数据便捷,信噪比高;并且同时克服了由于通道混叠与通道滤波造成的光谱畸变与光谱分辨率的降低,复原光谱精度较高,光谱分辨率与系统光谱分辨率一致,并且具有良好的实时

性. 该项研究对偏振成像光谱技术的理论研究以及工程应用都有着重要的指导意义.

参考文献

- [1] Joseph S T, Denis L G, David B C, Joseph A S 2006 *Appl. Opt.* **45** 5453
- [2] Zhu B H, Zhang C M, Jian X H, Zeng W F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 090701 (in Chinese) [祝宝辉, 张淳民, 简小华, 曾文锋 2012 物理学报 **61** 090701]
- [3] Denes L J, Gottlieb M S, Kaminsky B 1998 *Opt. Eng.* **37** 1262
- [4] Persky M J 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 4763
- [5] Oka K, Kato T 1999 *Opt. Lett.* **24** 1475
- [6] Tyo J S, Turner Jr T S 2001 *Appl. Opt.* **40** 1450
- [7] Gupta N, Dahmani R, Choy S 2002 *Opt. Eng.* **41** 1033
- [8] Gupta N, Voloshinov V 2004 *Appl. Opt.* **43** 2752
- [9] Jones S, Iannarilli F, Kebedian P 2004 *Opt. Express* **12** 6559
- [10] Avendaño-Alejo M, Rosete-Aguilar M 2006 *J. Opt. Soc. Am. A* **23** 926
- [11] Kevin W P, Theodore S T 1998 *Proc. SPIE* **3498** 223
- [12] Tyo J S, Theodore S T 1999 *Proc. SPIE* **3753** 214
- [13] Meng X, Li J, Liu D 2013 *Opt. Lett.* **38** 778
- [14] Guyot S, Anastasiadou M, Deléchéle E, Martino A D 2007 *Opt. Express* **15** 7393
- [15] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2002 *Opt. Comm.* **203** 21
- [16] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
- [17] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2008 *Opt. Comm.* **281** 2050
- [18] Zhang C M, Jian X H 2010 *Opt. Lett.* **35** 366
- [19] Zhang C M, Zhu H C, Zhao B C 2011 *Opt. Express* **19** 9626
- [20] Zhang C M, He J 2006 *Opt. Express* **14** 12561
- [21] Zhang C M, Xiang L B 2010 *Interference Imaging Spectroscopy* (Beijing: Science Press) p54 (in Chinese) [张淳民, 相里斌 2010 干涉成像光谱技术 (北京: 科学出版社) 第 54 页]
- [22] Zhang C M, Liu N, Wu F Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 949 (in Chinese) [张淳民, 刘宁, 吴福 2010 物理学报 **59** 949]
- [23] Mu T K, Zhang C M, Ren W Y, Zhang L, Zhu B H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 070704 (in Chinese) [穆廷魁, 张淳民, 任文艺, 张霖, 祝宝辉 2011 物理学报 **60** 070704]
- [24] Jones S H, Iannarilli F J, Kebedian P L 2004 *Opt. Express* **12** 6559
- [25] Craven-Jones J, Kudenov M W, Stapelbroek M G 2011 *Appl. Opt.* **50** 1170
- [26] Zhao Y Q, Zhang L, Pan Q 2009 *Appl. Opt.* **48** 236
- [27] Kudenov M W, Hagen N A, Dereniak E L 2007 *Opt. Express* **15** 12792
- [28] Snik F, Karalidi T, Keller C U 2009 *Appl. Opt.* **48** 1337
- [29] Roy A, Rafert J B 2004 *Proc. SPIE* **5298** 188
- [30] Zamora G, Truitt P, Nemeth S, Raman B, Soliz P 2004 *Proc. SPIE* **5314** 138
- [31] Hashimoto M, Kawata S 1992 *Appl. Opt.* **31** 6096
- [32] Padgett M J, Harvey A R, Duncan A J, Sibbett W 1994 *Appl. Opt.* **33** 6035

Channeled spectropolarimetry based on division of aperture and field of view*

Quan Nai-Cheng Zhang Chun-Min[†] Mu Ting-Kui

(*Institute of Space Optics, School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 30 November 2015; revised manuscript received 13 January 2016)

Abstract

In order to obtain accurate image, spectrum and polarization state of target by the interferometric channeled spectropolarimeter, the interferogram and the image need to be separated. Although it can be achieved by digital image processing technology, heavy computations with approximation would be introduced. In the application of channeled spectropolarimetry, an inevitable crosstalk will be present between channels of the interferogram formed on the CCD. Spatial filtering in the optical path difference domain will generate a loss of spectral resolution and the distortion of the recovered spectrum. To overcome these drawbacks, a static imaging channeled spectropolarimeter based on division of aperture and field of view is presented. The aperture is divided by a polarization array, which consists of two polarizers with their transmission axes perpendicular to each other. The field of view is divided by a pair of lenses with the same focal lengths. The spectral modulation module is composed of an achromatic quarter wave plate, a retarder and a polarization array. The interference system consists of an achromatic half wave plate, a Wollaston prism, and a Savart polariscope. Two pairs of in-phase and anti-phase interferogram with different intensity modulations can be obtained simultaneously on a single detector array. The pure image of the target is acquired by the summation of the four interferograms. The background intensity is removed by the subtraction of the interferograms with in-phase and anti-phase, and the pure interference fringes can be acquired. By the summation and subtraction of the two pure interference fringes, the single channeled interference fringes corresponding to spectrum of intensity and linear polarization state can be obtained. Spectral and polarization information of the target are acquired by Fourier transform of the single channeled interference fringes. Compared with previous instruments, the described model has the significant advantage that the background intensity can be removed from the hardware of the layout, and thus avoiding the spatial filtering in the optical path difference domain. The obtained spectra have the same resolutions as those obtained from the interference system, and the distortion of the recovered spectrum can also be vanished. Since there is neither rotating part nor moving part, the system is relatively robust. In the present paper, the principle of the instrument is described, and the interference fringe intensity distribution formula is obtained and analyzed. The performance of the system is demonstrated through a numerical simulation. This work will provide an important theoretical basis and the practical instruction for designing a new type of imaging spectropolarimeter and its engineering applications.

Keywords: imaging spectropolarimeter, channeled spectrometry, division of aperture, division of field of view

PACS: 07.60.Rd, 07.60.Fs, 42.25.Hz, 42.25.Ja

DOI: [10.7498/aps.65.080703](https://doi.org/10.7498/aps.65.080703)

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012AA121101), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41530422), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61540018, 61275184, 61405153), the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 32-Y30B08-9001-13/15), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20130201120047).

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