

基于微偏振阵列的干涉型高光谱偏振成像方法

柏财勋^{1,2}, 李建欣^{1,2}, 周建强², 刘 勤², 徐文辉²

- (1. 南京理工大学 先进固体激光工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 210094;
2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:光谱和偏振辐射特性是实现精细目标识别的重要光学参量,融合光谱和偏振信息分量的光谱偏振成像探测技术有效利用两者的互补性,提高在复杂背景环境下的目标识别能力,在环境监测、军事侦察和大气分析等领域具有巨大的发展潜力。围绕目标的光谱和偏振信息探测问题,研究了一种基于微偏振阵列的干涉型高光谱偏振成像技术。在研究 Sagnac 干涉型高光谱成像技术的基础上,利用微偏振阵列调制原理引入 Stokes 偏振分量信息探测。通过分析系统的工作原理,设计了系统的干涉成像光路模型,并对光谱信息反演方法以及偏振信息提取方法进行了讨论分析。搭建了实验装置,对实际场景目标进行了光谱偏振成像实验,得到了较好的实验结果。研究表明:该光谱偏振成像技术不仅具有高光通量、高光谱分辨率的优点,而且能够实现偏振信息的同步获取。

关键词:光谱学; 傅里叶变换; 偏振成像; 微偏振阵列

中图分类号: O433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0138003

Interferometric hyperspectral polarization imaging method based on micro-polarization array

Bai Caixun^{1,2}, Li Jianxin^{1,2}, Zhou Jianqiang², Liu Qin², Xu Wenhui²

- (1. MIIT Key Laboratory of Advanced Solid Laser, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The spectrum and polarization which were often used to identify the target were important radiation characteristics of the target. The detection technology that fused spectral and polarization information and owned the advantages of both significantly improved the ability to effectively identify the target in a complex background. It played an important role in the field of environment monitoring, military reconnaissance and atmosphere analysis. Around the problem of detecting the target spectra and polarization information, a fusing imaging method to detect hyperspectral and Stokes polarization information was researched. The method detected polarization information with the principle of micro-polarization array modulation on the basis of the Sagnac Fourier transform imaging spectrometer. Then a model of

收稿日期:2016-05-10; 修订日期:2016-06-20

基金项目:国家自然科学基金(61475072);中央高校基本科研业务费专项资金(30916014112-010);江苏省研究生科研创新计划(KYLX16_0426)

作者简介:柏财勋(1991-),男,博士生,主要从事干涉成像光谱偏振技术方面的研究。Email:baicaixun@163.com

导师简介:李建欣(1977-),男,副教授,博士生导师,博士,主要从事精密光学测试和干涉成像光谱技术方面的研究。
Email:ljsx@vip.163.com

the imaging system was designed while the spectrum recovery method and extraction mode of the polarization information were discussed. A prototype was developed and good experimental results of an actual scene objects were obtained. The research shows that besides high throughput and high spectral resolution, the advantages that four polarized fringe patterns are obtained simultaneously also achieved in this method.

Key words: spectroscopy; Fourier transform; polarization imaging; micro-polarization array

0 引言

干涉型高光谱偏振成像技术是一种能够同时获取目标二维图像信息及每一点光谱信息和偏振信息的高新光学探测技术。通过分析多维信息可以更好的对目标进行识别鉴定,该技术在环境监测、生物医学和大气分析等领域具有巨大的发展潜力^[1-3]。近年来,国内外研究人员对其进行了深入研究,提出了各具特色的技术方案。日本学者 Oka 等人提出了一种通道调制光谱偏振探测技术,通过在光谱探测系统中加入两片相位延迟片和一片偏振片组成的偏振调制器,将不通偏振态组合的干涉信息调制到不同的光程差处,提取各通道的干涉信息进行光谱反演,组合分析后可得到探测目标的全 Stokes 偏振光谱信息。但由于将干涉采样空间分为不同的偏振通道,每个通道的光程差受到限制,且干涉信息之间存在混叠,降低了系统的光谱分辨率^[4]。美国学者 Pezzaniti 和 Chenault 提出一种基于孔径分割思想的偏振成像技术,可以在探测器靶面上形成四个视场相同、偏振态不同的目标场景图像。但系统需要引入由准直物镜、微透镜阵列和偏振阵列组成的中继成像系统,结构较复杂^[5]。Goldstein 提出一种分时调制的偏振探测转置,通过多次旋转相位延迟器的光轴方向,改变系统穆勒调制矩阵,采集多组光强信息,最后解调出探测目标的偏振信息。该系统需要动态调制,无法实现偏振信息的实时探测^[6]。此类偏振技术与光谱探测技术相结合,可实现光谱信息和偏振信息的同步获取,但也使得光谱偏振成像系统普遍存在系统结构复杂、需要动态调制等问题。Gupta 研制了一种基于 AOTF 声光调制和 LCVR 电控液晶调制的光谱偏振成像系统,同样存在探测时间长和系统的透光效率低的缺点^[7]。另外,国内北京光电技术研究所、西安交通大学等单位也对此类技术也进行了大量研究^[8-12]。

针对光谱技术与偏振技术的快速融合成像问

题,文中研究一种基于微偏振阵列的干涉成像光谱偏振技术方案,通过在高光谱成像系统的探测器靶面前加入微偏振阵列进行偏振调制,实现光谱信息与偏振信息同时快速探测。

1 干涉型高光谱偏振成像系统

干涉型高光谱偏振成像系统包括前置光学系统、Sagnac 横向剪切分束器、成像物镜 $L3$ 、微偏振阵列(Micro-Polarization Array, MPA)以及探测器 CCD 组成,如图 1 所示。

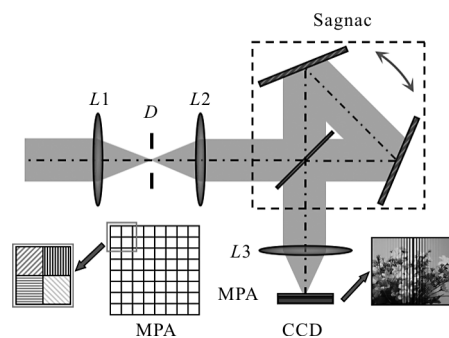


图 1 干涉型高光谱偏振成像系统

Fig.1 Interferometric hyperspectral polarization imager

其中前置光学系统包括前置成像物镜 $L1$ 、光阑 D 和准直物镜 $L2$,前置成像物镜的像平面与准直物镜前焦面重合。探测目标上的物点发射或者反射的光束首先经过前置成像物镜成像,在其像面上得到探测目标的清晰实像。该实像位于准直物镜的前焦面处,经过准直物镜后,像点发出的光束被准直为平行光束,并以原物点对应的视场角进入 Sagnac 横向剪切分束器。每条光线被横向剪切为平行的两条光线,并且两束平行光的等相位面与横向剪切分束器的出射面平行,而对于后面的成像系统而言,入射平行光的等光程面垂直于入射光束。当横向剪切分束器的出射面垂直于系统光轴时,对于视场角不为零的光束,两个等光程面不重合,则入射平行光束通过成像系统到达像面同一点时,由于存在光程差会

在探测器靶面上成像并发生干涉^[13],干涉场强度分布为:

$$I(\Delta) \int_0^{+\infty} B(\sigma)(1+\cos(2\pi\sigma\Delta))d\sigma \quad (1)$$

式中: $B(\sigma)$ 为探测目标的光谱信息,其中 σ 为波数,与波长 λ 成倒数关系; Δ 为光程差,几何关系为 $\Delta=dsin\theta$, d 为横向剪切分束器的剪切量, θ 为光束进入剪切器的入射角,即探测目标点对应的视场角。系统工作时,采用凝视成像探测方式,通过内部旋转扫描横向剪切分束器,获取探测目标的一系列干涉图像,从图像序列中依次提取某一个物点在不同光程差调制下的干涉信息,然后进行傅里叶变换即可复原得到该目标点的光谱信息。采用这种扫描方式,一方面,能够有效增大采样信号的动态范围,提高复原图谱的信噪比;另一方面,能够扩大光程扫描范围,获得更高的光谱分辨率。由于系统不需要额外的外置扫描云台,可以实现结构的一体化和轻小型化,适合实验室和野外等场合的携带式应用。

2 微偏振阵列调制原理

在视场调制干涉型高光谱成像系统基础上加入偏振调制组件进行偏振调制。采用微偏振阵列作为偏振调制器件,它主要由若干个相同的偏振调制单元组成。每个偏振调制单元包括四个偏振方向不同的线偏振子单元,同时每个子单元又与探测器靶面的像素一一对应。文中通过分析微偏振阵列系统的穆勒矩阵来分析其偏振调制原理。首先,线偏振器的米勒矩阵为:

$$M_p(\varphi)=\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\varphi) & \sin(2\varphi) & 0 \\ \cos(2\varphi) & \cos^2(2\varphi) & \sin(2\varphi)\cos(2\varphi) & 0 \\ \sin(2\varphi) & \sin(2\varphi)\cos(2\varphi) & \sin^2(2\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: φ 为偏振片的透光轴与参考轴的夹角。根据探测器采集图像每个像素的偏振调制状态,可以将一幅图像分解为四幅偏振子图像,四幅图像对应的线偏振调制方向分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° ,如图2所示。

由公式(2)可知, 0° 线偏振态图形对应的穆勒调制矩阵为:

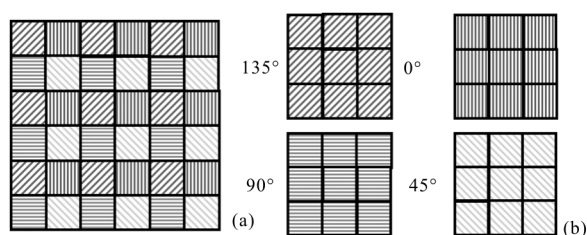


图 2 微偏振阵列示意图线偏振子图像

Fig.2 Micro-polarization array and line polarization sub-images

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_0+S_1 \\ S_0+S_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $[S_0 S_1 S_2 S_3]$ 为探测目标的偏振光谱分量, 45° 线偏振态图形对应的穆勒调制矩阵为:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_0+S_2 \\ 0 \\ S_0+S_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

90° 线偏振态图形对应的穆勒调制矩阵为:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_0-S_1 \\ -S_0+S_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

135° 线偏振态图形对应的穆勒调制矩阵为:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_0-S_2 \\ 0 \\ -S_0+S_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

探测器只能探测到调制光束的光强分量,光束经过微偏振阵列调制后,由公式(3)~(6)可知,每个偏振调制单元的4个线偏振子单元采集到4个光强信息 $[I_0 I_{45} I_{90} I_{135}]$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} I_0 &= \int_0^{+\infty} (S_0+S_1)(1+\cos(2\pi\sigma\Delta))d\sigma \\ I_{45} &= \int_0^{+\infty} (S_0+S_2)(1+\cos(2\pi\sigma\Delta))d\sigma \\ I_{90} &= \int_0^{+\infty} (S_0-S_1)(1+\cos(2\pi\sigma\Delta))d\sigma \\ I_{135} &= \int_0^{+\infty} (S_0-S_2)(1+\cos(2\pi\sigma\Delta))d\sigma \end{aligned} \quad (7)$$

对采集到的干涉光强信号进行傅里叶变换处理,得到四组对应的光谱信息,分别为 F_0 、 F_{45} 、 F_{90} 、 F_{135} 。

由公式(7)可以得到探测目标各偏振分量的光谱强度:

$$\begin{aligned} S_0(\sigma) &= F_0(\sigma) + F_{90}(\sigma) \\ S_1(\sigma) &= F_0(\sigma) - F_{90}(\sigma) \\ S_2(\sigma) &= F_{45}(\sigma) - F_{135}(\sigma) \end{aligned} \quad (8)$$

3 实验与分析

3.1 干涉数据采集

在研究系统干涉调制原理以及偏振调制原理的基础上,搭建了干涉成像光谱偏振系统实验装置,采用白炽灯作为光源,对目标场景进行了成像实验,采集到的干涉条纹图如图 3 所示。可以看出,实验得到的干涉图像纹理清晰,表明基于微偏振阵列的干涉成像光谱偏振系统能够获取清晰、对比度较好的干涉图像。将干涉图像中的方形区域放大可以看出,相邻 4 个像素点具有明显的光强差异。

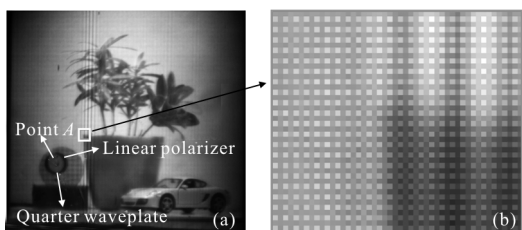


图 3 探测器采集的偏振干涉图

Fig.3 Polarization interferogram collected by detector

系统采用凝视型扫描模式,通过旋转 Sagnac 横向剪切分束器实现对实验场景中各目标点的光程差调制。实验系统扫描过程中,探测器采集到 800 多幅干涉序列图像,如图 4 为四幅不同扫描位置时获取



图 4 干涉图像序列

Fig.4 Interferograms of the target

的干涉图像。在这种扫描模式下,成像目标的视场中的位置不变,而干涉条纹的位置从视场一端移动到另外一端。

3.2 通道图像提取

根据微偏振阵列的调制原理,分别提取 4 个线偏振通道的光强信息组成 4 个线偏振子图像,如图 5 所示。由于场景中线偏振片的透光轴方向与微偏振阵列中 0°线偏振子单元的透光轴方向一致,所以图像中线偏振片区域的光强在 0°线偏振子图像最强,在 90°线偏振子图像最弱。四分之一波片的快轴与偏振片的透光轴夹角为 45°,该区域出射光为圆偏振光,因此在四幅线偏振子图像中对应的光强大致相同。实验结果与理论分析结果吻合,初步验证了基于微偏振阵列的偏振调制方案的可行性。

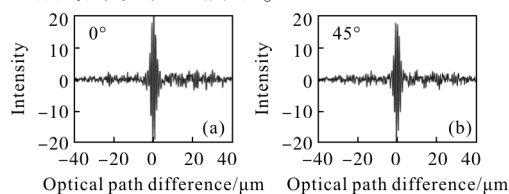


图 5 4 个不同偏振的干涉条纹图像

Fig.5 Four interferograms with different polarization states

3.3 偏振光谱反演

为了进一步验证文中所研究方法的光谱偏振成像特性,利用傅里叶变换算法对干涉数据进行光谱复原。首先,分别提取探测场景目标各点在 4 个线偏振子图像序列中的干涉光强信息,并对其进行去趋势项、切趾等常规的干涉数据预处理过程,图像中 A 点处理后结果如图 6 所示。



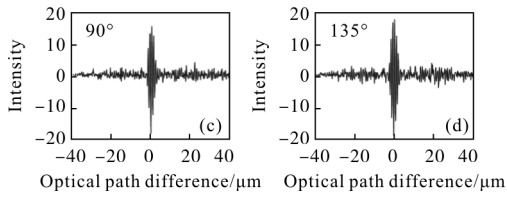


图 6 A 点不同线偏振态的干涉光强曲线

Fig.6 Fringe patterns with different polarization states of point A

然后利用傅里叶变换算法对 A 点的四组线偏振干涉信息进行数据反演,得到它在线偏振态为 0°、45°、90°和 135°时的光谱信息,图 7 为 A 点的 4 组线偏振态光谱曲线。对图像中每一个探测点进行相同的处理,可以得到探测目标四种线偏振态下的光谱图像,图 8 给出了目标图像在 545、577 和 612nm 3 个谱段处,每一个谱段所对应的四种线偏振态光谱图像。

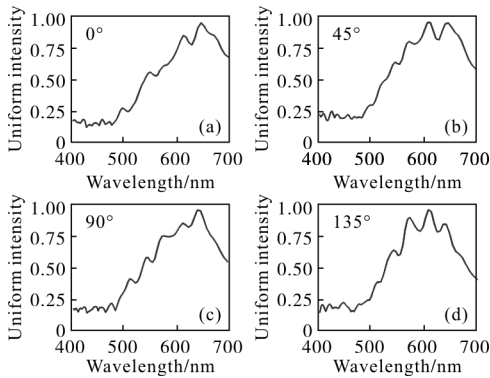


图 7 A 点不同线偏振态的复原光谱曲线

Fig.7 Recovery spectrum with different polarization states of point A

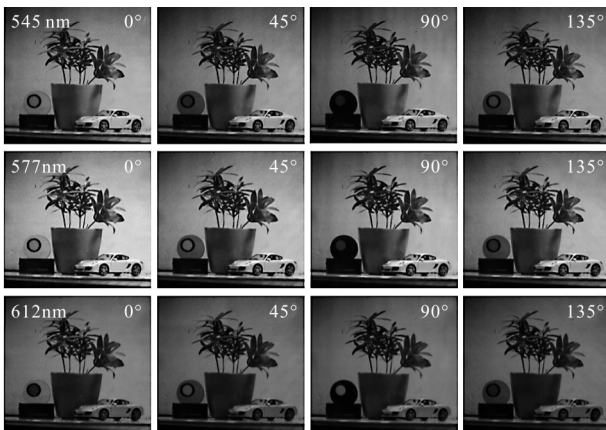


图 8 4 种线偏振态复原光谱图像

Fig.8 Recovery spectrum images at four linear polarization states

根据公式(8)可知,通过探测目标的四种线偏振态光谱信息可以分析得到其前 3 个 Stokes 偏振分量

的光谱信息。同样以图像中 A 点为例,将它在线偏振态为 0°、45°、90°和 135°时的光谱信息按照公式(8)进行组合分析,分别得到其 Stokes 偏振分量 S_0 、 S_1 和 S_2 对应的偏振光谱曲线,如图 9 所示。由于 A 点所在区域的光线对应偏振态为圆偏振,所以 Stokes 分量中的 S_1 和 S_2 偏振分量对应的光谱强度应该接近于零,实验结果中偏振光谱复原误差主要来源于目标场景中偏振片透光轴和波片快轴的装调误差。另外,实验系统光学元件的加工误差、装调误差等同样会对最终的光谱复原结果造成影响。

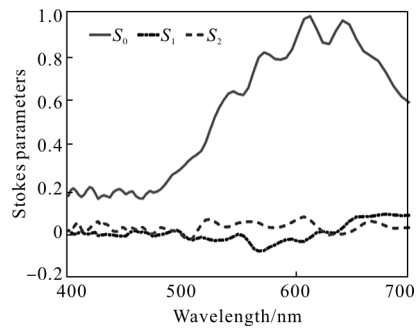


图 9 A 点 Stokes 偏振分量光谱曲线

Fig.9 Stoke polarization spectrum of point A

对目标图像中所有像素点利用上述方法进行分析,得到 3 个 Stokes 分量对应的偏振光谱图像,图 10 给出了 545、577 和 612 nm 的 3 个 Stokes 分量偏振光谱图像。从实验结果可以看出, S_0 分量的偏振光谱图像代表着目标图像的光强信息,而 S_1 和 S_2 分量的

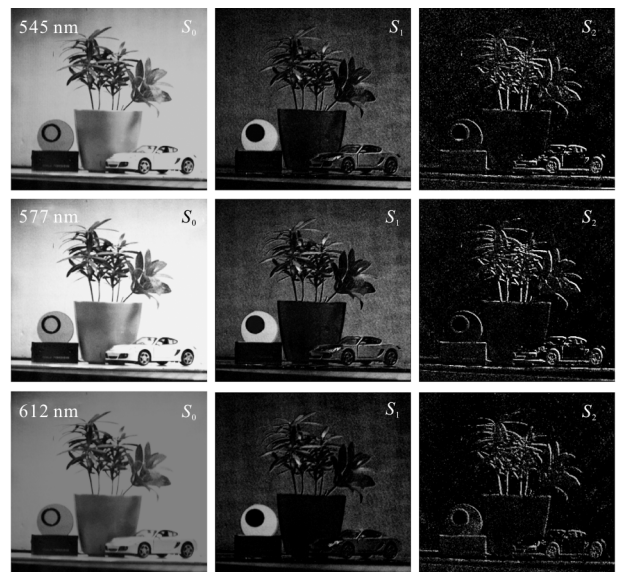


图 10 3 个 Stokes 偏振分量复原光谱图像

Fig.10 Recovery spectrum images of three Stokes parameters

偏振光谱图像则表示目标图像的 0° 和 45° 的线偏振信息。实验结果中, S_0 分量偏振光谱图像可以清晰展示目标图像信息; S_1 分量偏振光谱图像中可以展示目标图像垂直方向的偏振信息, 在该偏振光谱图像中偏振片区域的偏振特征明显; 而 S_2 分量偏振光谱图像中, 目标图像斜 45° 分量的轮廓信息较明显, 这一现象是瞬时视场角误差与目标边缘偏振特性共同作用的结果。实验结果清晰可靠, 进一步证明了基于微偏振阵列的干涉成像光谱偏振方案的可行性。

4 结 论

为探索新的光谱偏振成像技术方案, 对基于微偏振阵列的干涉成像光谱偏振系统进行了研究, 在 Sagnac 干涉型高光谱成像方案中, 利用微偏振阵列进行通道线偏振调制获取四维的干涉偏振光场, 探测器相邻四个像素输出携带不同线偏振态的干涉图像数据, 可以实现干涉和偏振信息的同步获取。介绍了新型成像系统的光路模型, 并详细讨论了其光谱偏振融合成像的原理。按照设计后的成像系统模型搭建实验装置, 对实际场景目标进行了偏振光谱成像实验, 结合实验结果论述了偏振干涉信息提取、光谱反演以及 Stokes 偏振分量分离等数据处理过程。实验结果表明, 该干涉成像光谱偏振技术不仅具有高光通量、高光谱分辨率的优点, 而且能够实现偏振信息的同步获取。另外, 本方法将微偏振阵列直接放置在探测器靶面前, 光路结构中不需要复杂的偏振调制组件, 能够有效实现仪器的轻小型化。

参考文献:

- [1] Diner D J, Chipman R A, Beaudry N, et al. An integrated multiangle, multispectral, and polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing from space [C]//SPIE, 2005, 5659: 88-96.
- [2] Stenflo J O, Twerenbold D, Harvey J W, et al. Coherent scattering in the solar spectrum: survey of linear polarization in the range 4200-9950 [J]. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1983, 54: 505-514.
- [3] Yuan Yueming, Xiong Wei, Fang yonghua, et al. Modeling analysis of detection of oil spills on water by differential polarization FTIR spectrometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (3): 408-412. (in Chinese)
袁越明, 熊伟, 方勇华, 等. 差分偏振 FTIR 光谱法探测水面溢油污染的模型分析 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (3): 408-412.
- [4] Kazuhiko Oka, Takayuki Kato. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum [J]. *Optics Letters*, 1999, 24 (21): 1475-1477.
- [5] J Larry Pezzaniti, Chenault David B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter [C]//SPIE, 2005, 5888: 58880V.
- [6] Dennis H G. Mueller matrix dual -rotating retarder polarimeter [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(31): 6676-6683.
- [7] Neelam Gupta. Acousto -optic tunable filter based spectropolarimetric imagers [C]//SPIE, 2008, 6972: 69720C.
- [8] Li Jie, Zhu Jingping, Wu Haiying. Compact static Fourier transform imaging spectropolarimeter based on channeled polarimetry [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3784-3786.
- [9] Meng Xin, Li Jianxin, Liu Defang, et al. Fourier transform imaging spectropolarimeter using simultaneous polarization modulation [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 778-780.
- [10] Zhang Chunmin, Wu Haiying, Li Jie. Fourier transform hyperspectral imaging polarimeter for remote sensing [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(6): 066201.
- [11] Meng Xin, Li Jianxin, Song Huaqing, et al. Full -stokes fourier -transform imaging spectropolarimeter using a time -division polarization modulator [J]. *Applied Optics*, 2014, 53 (24): 5275-5282.
- [12] Zhao Haibo, Li Huan, Lin Xuling, et al. Research on spectral polarization imaging system based on static modulation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(4): 1129-1133.
赵海博, 李欢, 林栩凌, 等. 静态调制的光谱偏振成像系统 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(4): 1129-1133.
- [13] Meng Xin, Li Jianxin, Li Suning, et al. Recovery algorithm of image plane interference imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 1-6. (in Chinese)
孟鑫, 李建欣, 李苏宁, 等. 像面干涉成像光谱技术中复原方法的研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 1-6.