

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.05.0010

# 基于 PSIM 的偏振光谱仪集成实验样机

胡劲松<sup>1</sup>, 宋志平<sup>1</sup>, 李志伟<sup>2</sup>, 张明辉<sup>1</sup>, 张子云<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601;

<sup>2</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230026 )

**摘 要:** 为了将偏振光谱强度调制 (Polarization spectral intensity modulation, PSIM) 技术应用于室外目标的偏振遥感测量, 在 PSIM 偏振光谱仪实验室搭台实验基础上, 开展了 PSIM 实验样机一体化集成设计。首先, 将由格兰泰勒棱镜和两块高阶石英晶体延迟器构成的调制器按照原理要求集成安装成一个组件, 再将该组件安装到光栅光谱仪的光学头部, 完成 PSIM 偏振光谱仪系统的硬件一体化设计。利用交互式数据语言 (Interactive data language, IDL) 程序设计语言编写程序, 将文件读写、数据处理及结果显示等功能集成在统一的用户界面中, 实现了 PSIM 偏振光谱仪系统数据处理算法软件的一体化设计。最后, 通过测量解析水平和垂直线偏振光的全 Stokes 矢量元素谱定性验证了实验样机的测量能力; 利用偏振定标系统完成了集成实验样机的偏振定标。实验数据处理结果表明: 实验样机能够实现待测光全 Stokes 矢量元素谱的同步获取; 偏振定标盒输出光的全谱段偏振度值, 实验样机的测量结果与理论输出结果间的最大误差约为 0.003。实现了集成实验样机的设计目标。

**关键词:** 偏振遥感; 偏振光谱仪; 偏振光谱强度调制; 光栅光谱仪

**中图分类号:** TP394.1; TH691.9

**文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6141(2019)05-0393-08

## Integrated Experimental Prototype of Spectropolarimeter Based on PSIM

HU Jingsong<sup>1</sup>, SONG Zhiping<sup>1</sup>, LI Zhiwei<sup>2</sup>, ZHANG Minghui<sup>1</sup>, ZHANG Ziyun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Physics and Materials Science, Anhui University, Hefei 230601, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In order to apply the polarization spectral intensity modulation (PSIM) technology to the fields of outdoor polarization remote sensing, an integrated PSIM spectropolarimeter experimental prototype is designed based on the laboratory principle model. First, a modulator consisting of a Glan-Taylor prism and two quartz crystal retarders is integrated into a module. Then the module is mounted on the head of

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences Astronomical Joint Fund(国家自然科学基金中国科学院天文联合基金, U1531113)

**作者简介:** 胡劲松 (1991 - ), 安徽合肥人, 研究生, 主要从事偏振光谱测量相关技术方面的研究。

**E-mail:** 1243606385@qq.com

**导师简介:** 宋志平 (1967 - ), 安徽合肥人, 博士, 教授, 主要从事偏振光谱信息获取新技术及应用方面的研究。

**E-mail:** zpsong@ahu.edu.cn

**收稿日期:** 2019-01-14; **修改日期:** 2019-01-21

the grating spectrometer to realize integrated hardware design of the PSIM spectropolarimeter. Based on interactive data language (IDL), the functions of file accessing, data processing and result displaying are integrated into one unified interface to realize an integrated software design of the PSIM spectropolarimeter. Finally, the measurement capability of the experimental prototype is verified by measuring the whole Stokes vector element spectrum of horizontal and vertical linear polarized light, and the polarization calibration of the experimental prototype is accomplished by using polarization calibration system. Experimental data processing results show that experimental prototype can synchronously achieve the whole Stokes vector element spectrum of the testing light, and the maximum error between the measured results of the experimental prototype and the theoretical output results is about 0.003 for the degree value of polarization in full spectrum of the light from the polarization calibration box. It is indicated that the design goal of integrated experimental prototype is realized.

**Key words:** polarization remote sensing; spectropolarimeter; polarization spectral intensity modulation; grating spectrometer

## 1 引言

在光学遥感测量领域, 偏振作为一维新的信息源, 正在引起光学遥感专家们越来越广泛的关注。偏振信息获取在大气气溶胶参数反演、地球表面土壤、植被及海洋特性遥感、军事伪装目标识别等领域的应用优势正在初步显现<sup>[1-10]</sup>。随着偏振信息在遥感应用领域的不断拓展, 对偏振信息获取系统的可靠性、便携性以及偏振信息获取精度的要求也越来越高, 各种新型偏振光谱信息获取方法不断涌现<sup>[11-14]</sup>。偏振光谱强度调制 (PSIM) 技术正是在此背景下诞生的一种全 Stokes 矢量元素谱、快照式 (Snapshot) 测量方法。采用该方法, 测量系统中的探测器只需一次曝光, 即可获得解析待测光四个完整 Stokes 矢量元素谱数据。单轴系统设计, 无转动件, 可有效避免分时测量或多轴并行偏振测量系统设计过程中所要解决的时间配准、空间配准难题。理论上可实现低成本、高可靠性、高精度偏振测量。在前期理论和实验研究的基础上, 完成了 PSIM 偏振光谱仪的软硬件系统集成, 并开展了初步的测量验证实验。集成后的 PSIM 偏振光谱仪实验样机有望应用于室外目标的偏振光谱遥感测量。

## 2 集成实验样机系统设计

### 2.1 集成实验样机的设计目标

PSIM 偏振光谱仪集成实验样机的设计目标包括以下几个方面:

- 1) 便携式, 可用于室外偏振光谱测量;
- 2) 光谱范围 500~650 nm (15385~20000  $\text{cm}^{-1}$ );
- 3) 偏振光谱分辨率 15 nm;
- 4) “快照式” 测量方式, 全 Stokes 矢量谱测量;
- 5) 偏振度测量精度优于 1%。

### 2.2 集成实验样机的硬件组成原理

PSIM 偏振光谱仪集成实验样机硬件由光栅光谱仪和集成调制器两部分组成。集成调制器安装在光栅光谱仪的光学头部。系统硬件组成如图 1 所示。

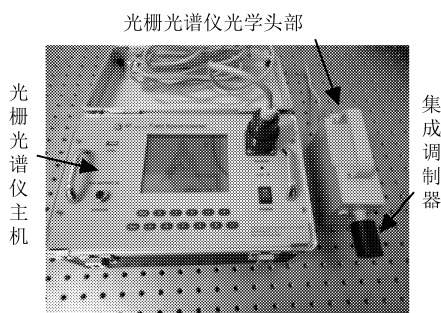


图 1 PSIM 偏振光谱仪集成实验样机

Fig.1 Integrated PSIM spectropolarimeter experimental prototype

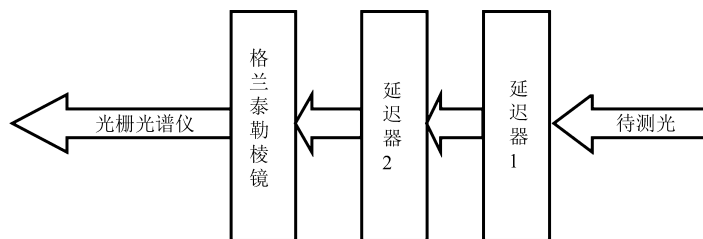


图 2 集成调制器组成示意图

Fig.2 Schematic of integrated modulator

图 1 中的光栅光谱仪采用中国科学院安徽光机所研制的商用产品 ISI921VF, 用于测量待测光经过调制器后输出的强度谱, 其主要参数为

- 1) 512 元线阵探测器;
- 2) 光谱范围 380~1050 nm;
- 3) 光谱分辨率 2 nm。

图 1 中的集成调制器中安装有一块格兰泰勒棱镜和两块高阶延迟器。其中延迟器 1 的厚度为 2 mm, 延迟器 2 的厚度为 4 mm, 它们的快轴方向夹角为 45°。格兰泰勒棱镜用作检偏器, 其透光轴方向与延迟器 1 的快轴方向一致。集成调制器的组成如图 2 所示。

PSIM 偏振光谱仪集成实验样机的工作原理如下:

当待测全色光进入集成调制器后, 集成调制器中的两块高阶延迟器为待测光的四个 Stokes 矢量 ( $S_0, S_1, S_2, S_3$ ) 元素谱形成不同频率的载波信号。集成调制器输出光信号的功率谱则是被不同频率载波调制后的待测光四个 Stokes 矢量元素谱的线性叠加。该功率谱的数学描述为<sup>[15]</sup>

$$P(\sigma) = \frac{1}{2}S_0(\sigma) + \frac{1}{2}S_1(\sigma) \cos[\phi_2(\sigma)] + \frac{1}{4}|S_{23}(\sigma)| \cos \left\{ \phi_2(\sigma) - \phi(\sigma) + \arg[S_{23}(\sigma)] \right\} - \frac{1}{4}|S_{23}(\sigma)| \cos \left\{ \phi_2(\sigma) + \phi_1(\sigma) - \arg[S_{23}(\sigma)] \right\} . \quad (1)$$

光栅光谱仪测量、显示并存储该功率谱, 通过 USB 口传至计算机, 再由计算机中的“PSIM 偏振光谱仪集成实验样机软件”解析出待测光的四个 Stokes 矢量元素谱, 实现偏振光谱仪测量功能。

### 2.3 集成实验样机的软件系统

#### 2.3.1 数据处理流程

PSIM 偏振光谱仪集成实验样机软件实现的主要功能是对光栅光谱仪的测量数据进行处理, 从中解析出待测光的四个 Stokes 矢量元素谱。具体数据处理流程如图 3 所示。其中, 强度谱数据预处理模块的功能是将光谱仪测量结果的波长单位转换成波数单位, 同时进行插值处理, 以保证光谱数据在波数维仍然是等间隔, 为后续的傅里叶变换处理做准备。傅里叶逆变换模块将光谱仪测量结果变换至光程差域。因为调制待测光四个 Stokes 矢量元素谱载波信号的中心频率, 在光程差域中对应不同的位置, 所以傅里叶逆变换后在光程差域中可通过数字滤波过程将它们分离开来, 再通过傅里叶变换和解调制处理完成待测光四个 Stokes 矢量元素谱的解析处理<sup>[16-18]</sup>。

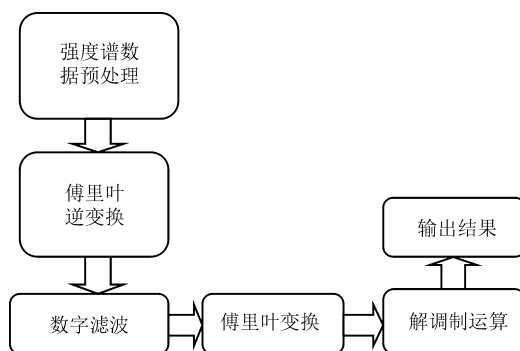


图3 PSIM 偏振光谱仪集成实验样机数据处理流程

Fig.3 Data processing flow of integrated PSIM spectropolarimeter experimental prototype

### 2.3.2 数据处理软件集成设计

PSIM 偏振光谱仪集成实验样机的软件系统由 IDL 程序设计语言编写，模块化设计，具有良好的用户界面，操作简单方便。软件系统的用户界面如下图 4 所示。



图4 软件系统用户界面

Fig.4 User interface of software system

用户可以通过文件选择按钮，从存储路径中选择未调制参考光、已调制参考光及待测光的光谱数据，根据硬件系统设计参数输入延迟器的厚度，选择是否采用高频载波信号等。设置完成后点击启动按钮开始数据处理过程。处理结束后保存所有的中间结果，也可以点击绘制图像下方区域的按钮直接查看结果图像。实验样机系统软件的集成设计大大提高了测量实验数据的处理效率。

## 3 实验样机性能定性评估

为评估集成 PSIM 偏振光谱仪实验样机测量结果的正确性，在实验室开展了测量验证实验。图 5 为实验系统的实物照片。

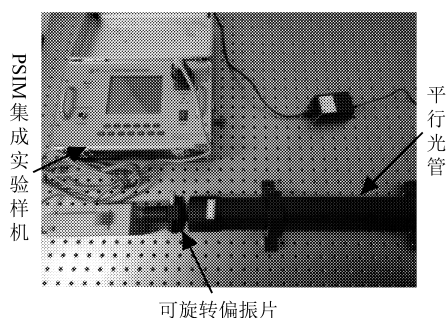


图 5 测量验证实验

Fig.5 Photo of measurement verification

以卤钨灯为光源的平行光管输出光信号, 经过金属线栅偏振片分别起偏为水平线偏振光和垂直线偏振光, 利用集成实验样机测量并解析它们的四个 Stokes 矢量元素谱, 结果如图 6、图 7 所示。

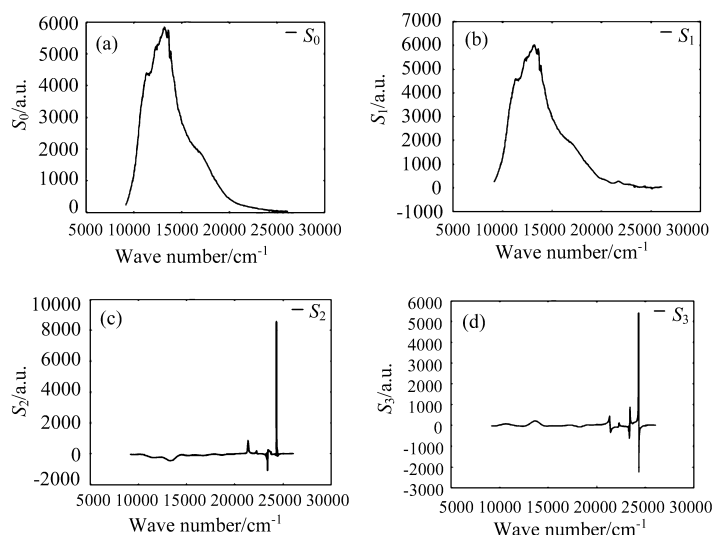


图 6 水平线偏振测量解析结果. (a) 水平线偏振光的  $S_0(\sigma)$ ; (b) 水平线偏振光的  $S_1(\sigma)$ ; (c) 水平线偏振光的  $S_2(\sigma)$ ; (d) 水平线偏振光的  $S_3(\sigma)$

Fig.6 Results of measurement and analysis of horizontal linear polarized light.

- (a)  $S_0(\sigma)$  of horizontal linear polarized light; (b)  $S_1(\sigma)$  of horizontal linear polarized light;  
 (c)  $S_2(\sigma)$  of horizontal linear polarized light; (d)  $S_3(\sigma)$  of horizontal linear polarized light

从图 6 和图 7 可以看出: 水平线偏振光的解析结果为  $S_0(\sigma) \approx S_1(\sigma)$ ,  $S_2(\sigma)$ 、 $S_3(\sigma)$  近似为 0; 垂直线偏振光的  $S_0(\sigma) \approx -S_1(\sigma)$ ,  $S_2(\sigma)$ 、 $S_3(\sigma)$  近似为 0, 与理论结果<sup>[19]</sup>基本一致, 表明集成实验样机测量解析结果是正确的。图 6、图 7 右端的畸变是由傅里叶变换过程中的边界效应引起的, 已在有效测量波段之外, 可忽略。

#### 4 实验样机的偏振定标

为把握仪器设计、加工和元器件非理想性带来的测量误差, 利用中科院安徽光机所研发的偏振定标系统, 对样机开展了偏振定标与检测实验。该定标系统是国内首台高精度偏振定标装置, 如图 8 所示。整个系统由积分球和偏振盒两部分构成, 偏振系统中的积分球是光辐射源, 其辐射出射为无偏振光, 偏振盒为

起偏装置, 其核心部件为两组玻堆片, 通过驱动电机精确控制玻堆片状态, 给出标准偏振度值, 以此作为偏振定标的基准。

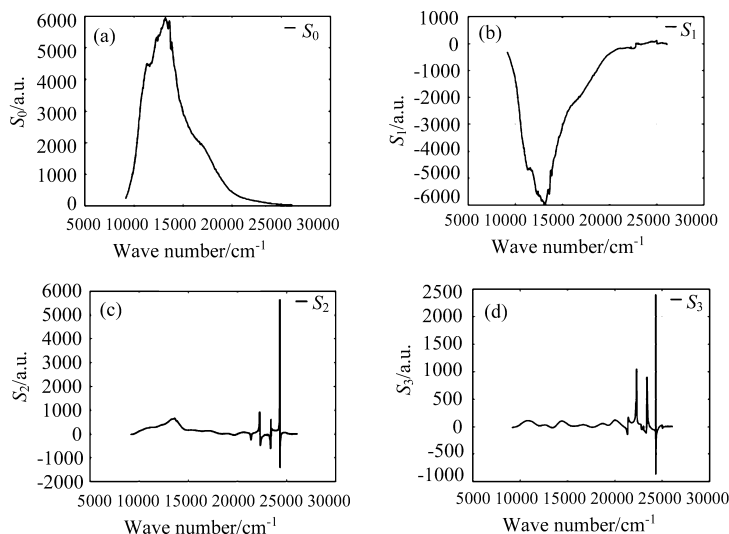


图 7 垂直线偏振测量解析结果. (a) 垂直线偏振光的  $S_0(\sigma)$ ; (b) 垂直线偏振光的  $S_1(\sigma)$ ; (c) 垂直线偏振光的  $S_2(\sigma)$ ; (d) 垂直线偏振光的  $S_3(\sigma)$

Fig.7 Results of measurement and analysis of vertical linear polarized light.

(a)  $S_0(\sigma)$  of vertical linear polarized light; (b)  $S_1(\sigma)$  of vertical linear polarized light;

(c)  $S_2(\sigma)$  of vertical linear polarized light; (d)  $S_3(\sigma)$  of vertical linear polarized light

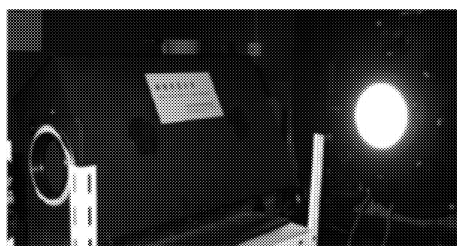


图 8 偏振定标系统实物图

Fig.8 Photo of polarization calibration system

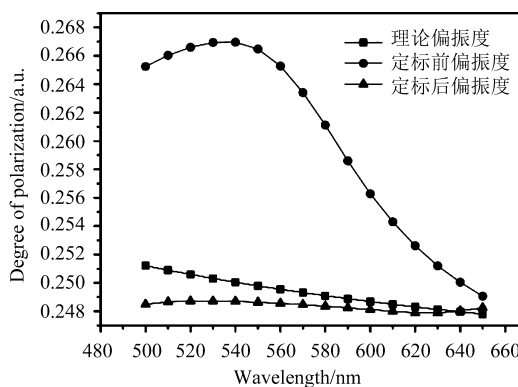


图 9 偏振定标结果

Fig.9 Results of polarization calibration

在定标实验中, 在 500~650 nm 波长范围内, 以 10 nm 为间隔对 16 个不同的波长进行偏振定标实验。对于每个波长, 以偏振系统 0、0.03、0.05、0.10、0.15、0.20、0.25 和 0.30 等八个出射偏振度作为标准, 进行偏振测量实验, 实验从短波长到长波长依次进行。对每个波长的八个标准偏振出射度, 分别测量出实验样机得到相应的偏振度, 在此基础上, 以偏振定标系统标准值为基础, 对样机测量偏振度进行线性拟合, 得到每个波长的拟合系数, 该系数即为定标系数。这里以偏振系统 650 nm 出射偏振度 0.25 的偏振光谱曲线为例, 展示经过偏振定标系数校正后的样机实测偏振光谱曲线校正效果, 如图 9 所示。

图 9 中的圆形点线、正方形点线及三角形点线分别表示不同波长点处的实验样机测量偏振度值、偏振定标盒输出标准偏振度值及结果经过定标校正后的偏振度值。从图 9 可以看出定标校正前后实验样机的测

量解析结果与标准偏振度值之间的偏差有了很大降低, 最大误差由 0.017 减小到约为 0.003。

## 5 结 论

在实验室搭台实验的基础上, 完成了 PSIM 偏振光谱仪实验样机的软硬件集成设计。水平和垂直线偏振光的测量实验定性验证了实验样机的全 Stokes 矢量谱同步获取能力。基于偏振定标系统的定标测量实验发现, 实验样机具有良好的响应线性度。对于偏振定标盒输出的、理论偏振度值为 0.25 的部分偏振光, 经定标校正后的实验样机测量解析结果与偏振定标盒的理论输出值间的最大误差约为 0.003, 表明实验样机具有较高的偏振测量精度, 基本实现了实验样机的设计目标。

### 参考文献:

- [1] Liu Yu, Zhao Yusheng, Liu Huanjun, et al. Analysis on Impact Factors of Thermal Polarized Radiation Characteristics of the Soil [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(6): 1813-1817(in Chinese).  
刘宇, 赵云升, 刘焕军, 等. 影响土壤偏振亮度温度的因子分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(6): 1813-1817.
- [2] Yang Bing, Yan Changxiang. Multi-Spectral Polarized Properties of Ocean Aerosol [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(9): 2736-2741(in Chinese).  
杨斌, 颜昌翔. 海洋气溶胶多光谱偏振特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(9): 2736-2741.
- [3] Zhang J Q, Shao J B, Yan C X. Cloud and aerosol polarimetric imager [C]. *SPIE*, 2014, 9142: 91420X.
- [4] Bret-dibat T, Ander Y, Laherrere J M. Pre-flight calibration of the POLDER instrument [C]. *SPIE*, 1995, 2553: 218-231.
- [5] Li Yan, Zhang Weijie, Chen Jiayu. Modeling and simulation for target detection in polarization scene [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(8): 2233-2243. (in Chinese).  
李岩, 张伟杰, 陈嘉玉. 偏振场景目标探测的建模与仿真 [J]. *光学·精密工程*, 2017, **25**(8): 2233-2243.
- [6] Renhorn I G E, Hallberg T, Boreman G D. Efficient polarimetric BRDF model [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(24): 31253.
- [7] Wang Xia, Liang Jianan, Long Huabao, et al. Experimental study on long wave infrared polarization imaging of typical background and objectives [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(7): 0704002(in Chinese).  
王霞, 梁建安, 龙华宝, 等. 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(7): 0704002.
- [8] Gao Jun, Bi Ran, Zhao Lujian, et al. Global optimized hazed image reconstruction based on polarization information [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(8): 2212-2219(in Chinese).  
高隽, 毕冉, 赵录建, 等. 利用偏振信息的雾天图像全局最优重构 [J]. *光学·精密工程*, 2017, **25**(8): 2212-2219.
- [9] Sun Jie, Gao Jun, Huai Yu, et al. Real time measurement system for the pattern of all skylight polarization [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(9): 45-50, 55(in Chinese).  
孙洁, 高隽, 怀宇, 等. 全天域大气偏振模式的实时测量系统 [J]. *光电工程*, 2016, **43**(9): 45-50, 55.
- [10] Xu Jiang, Qian Weixian, Lu Dongming, et al. Study on the Distinguishment of Camouflage Paints Based on Depolarization Characteristics [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, **37**(1): 183-188(in Chinese).  
徐将, 钱惟贤, 路东明, 等. 基于退偏振特性分辨伪装涂层的研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, **37**(1): 183-188.

- [11] Chu Jinkui, Zhang Huixia, Wang Yanlong, *et al.* Design and construction of autonomous real-time position prototype based on multi-polarized skylight [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(2): 312-318(in Chinese).  
褚金奎, 张慧霞, 王寅龙, 等. 多方向偏振光实时定位样机的设计与搭建 [J]. *光学·精密工程*, 2017, **25**(2): 312-318.
- [12] Yang Bin, Yan Changxiang, Zhang Junqiang, *et al.* Polarimetric calibration of multi-channel polarimetric imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(5): 1126-1133(in Chinese).  
杨 斌, 颜昌翔, 张军强, 等. 多通道型偏振成像仪的偏振定标 [J]. *光学·精密工程*, 2017, **25**(5): 1126-1133.
- [13] Zhang Rui, Chen Youhua, Li Shiwei, *et al.* The Research of Spectral Polarization Imaging Detection System Based Dual-AOTFs [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(5): 1549-1553(in Chinese).  
张 瑞, 陈友华, 李世伟, 等. 基于双 AOTF 的新型成像光谱偏振探测系统 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(5): 1549-1553.
- [14] Zhao Jia, Zhou Feng, Li Huan, *et al.* Research on New Type of Spectral Modulation Polarization Measurement Technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(10): 2906-2910(in Chinese).  
赵 佳, 周 峰, 李 欢, 等. 新型光谱调制偏振测量技术研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(10): 2906-2910.
- [15] Song Zhiping, Hong Jin, Qiao Yanli. System design of intensity modulation spectropolarimeter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(11): 2325-2331(in Chinese).  
宋志平, 洪 津, 乔延利. 强度调制偏振光谱仪的系统设计 [J]. *光学(中间加个点)精密工程*, 2010, **18**(11): 2325-2331.
- [16] Song Zhiping, Zhang Minghui, Hong Jin. Measured data processing method of spetropolarimeter based on PSIM technology [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2016, **33**(2): 249-256(in Chinese).  
宋志平, 张明辉, 洪 津. 基于 PSIM 技术的偏振光谱仪测量数据处理方法 [J]. *量子电子学报*, 2016, **33**(2): 249-256.
- [17] Song Zhiping, Hong Jin, Qiao Yanli. Method Acquiring the Demodulation Coefficients of Intensity-Modulated Spectropolarimeter by Measuring Reference Light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0412003-1-6(in Chinese).  
宋志平, 洪 津, 乔延利. 强度调制偏振光谱仪解调系数参考光测量方法 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(4):0412003-1-6.
- [18] Song Zhiping, Zhang Minghui, Hong Jin, *et al.* Simple and precise method for assembling the modulator of an intensity modulation spectropolarimeter [J]. *Optical Technique*, 2014, **40**(6): 560-564(in Chinese).  
宋志平, 张明辉, 洪 津, 等. 新型偏振光谱仪调制器的简易装调方法 [J]. *光学技术*, 2014, **40**(6): 560-564.
- [19] Liao Yanbiao. *Polarization Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003(in Chinese).  
廖延彪. *偏振光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2003.