

偏振光谱识别光学系统的复原方法与设计

穆 竺¹, 王加科^{1*}, 吴从均², 颜昌翔², 刘智颖¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022 ;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为准确方便获取 4 个波长相关的斯托克斯参量, 可采用强度调制型偏振光谱成像技术, 从偏振光谱强度调制理论与傅里叶变换解调方法入手分析推导计算了偏振光谱信息的复原过程, 据此得到了系统的基本结构。以模块化设计的思路分别设计了光谱部分光学系统的前置望远物镜及 Offner 分光系统, 设计结果实现了在 400~1 000 nm 谱段光谱分辨率 1.24 nm, 并结合光谱系统参数匹配设计完成了前端偏振光谱调制模块, 给出了一套完整的设计实例。最后通过实验验证了偏振光谱调制模块设计的合理性与傅里叶变换解调方法的可行性, 为偏振光谱信息复原奠定了基础。

关键词: 光学设计; 偏振光谱复原; 强度调制; 光谱系统; 傅里叶变换

中图分类号: O435 ; O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0518004

Restoration method and design of polarization spectral recognition optical system

Mu Zhu¹, Wang Jiako^{1*}, Wu Congjun², Yan Changxiang², Liu Zhiying¹

(1. Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to accurately and easily obtain four wavelength-dependent Stokes parameters, the intensity modulated polarization spectral imaging technology was used. The process of the restoration of polarization spectrum was calculated and derived from polarization spectrum intensity modulation theory and Fourier transform demodulation analysis, and the basic structure of the system was obtained. According to the modular design concept, the forward telescope objective lens and Offner spectral dispersion system of the spectrometer optical system were designed, which achieved a spectral resolution of 1.24 nm in the 400–1 000 nm spectral range. And then the front polarization spectrum modulation module was designed based on spectral system parameter, so a complete design example was given. Finally, the reasonability of the polarization spectrum modulation module design and feasibility of the

收稿日期: 2018-12-15; 修订日期: 2019-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(11474037)

作者简介: 穆竺(1993-), 女, 硕士生, 主要从事光学系统设计方面的研究。Email: muz100103@126.com

导师简介: 刘智颖(1981-), 女, 教授, 博士, 主要从事光学设计与检测等方面的研究。Email: lzyccccc@126.com

通讯作者: 王加科(1983-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光机结构设计、系统集成设计方面的研究。Email: wangjk5013@163.com

Fourier transform demodulation method were verified by experiments, which lays the foundation for the recovery of polarization spectrum.

Key words: optical design; restoration of polarization spectrum; intensity modulation; spectral system; Fourier transform

0 引言

随着应用需求的日益提高,对目标识别与信息获取的能力与精度都有了更高的追求。人们已经研究出各种各样的光学信息获取技术,如成像技术、光谱技术^[1]等,利用这些技术可以获取目标各种不同信息。但传统的目标识别主要为图像识别,其受环境光、目标光等影响较为明显,特别是针对颜色相似或是伪装目标更是难以区分。研究发现偏振信息可以反映目标形貌取向、表面粗糙度、致密度、电导率、含水量等特性,可将其应用到目标识别与成像技术中提高目标对比度、减小杂散光的干扰^[2]。于是近年来出现了一种将成像技术、光谱技术和偏振技术融为一体的偏振光谱成像技术^[3],能够大大提高目标探测的信息量和识别的准确度。

偏振光谱成像技术需要攻克的难点在于偏振光谱信息的获取,受基础原理的限制,完整表征一束光的偏振和光谱状态,需要获得 4 个波长相关的斯托克斯(Stokes)参量,通常的方法是建立 4 个独立的方程求解这 4 个未知数,反映到具体方案上即需改变不同的条件,连续进行 4 次测量,这将造成仪器函数必须在时间尺度或空间尺度上改变 4 次,从而导致仪器结构复杂、制作与装配工艺难度大、稳定性差等一系列问题,这也成为制约该技术与应用的主要障碍^[4-5]。而偏振光谱强度调制技术^[6](Polarimetric Spectral Intensity Modulation, PSIM) 配合特定的 Stokes 光谱复原方法,可以在单次测量中实现对目标偏振信息和光谱信息的同时获取,弥补了传统偏振光谱成像技术需要进行时间调制或空间调制的不足。因此,文中基于 PSIM 对偏振光谱成像系统进行了参数匹配计算与光学系统的设计分析,再经傅里叶变换复原法最终可实现偏振信息与光谱信息的复原。

$$M_{SM} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos^2 2\theta_2(v) + \cos\varphi_2(v)\sin^2 2\theta_2(v) & \mu\cos\varphi_1(v) - \tau\sin\varphi_1(v) & \mu\sin\varphi_1(v) - \tau\cos\varphi_1(v) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

1 偏振光谱复原原理与系统的基本结构

偏振光谱复原主要基于 PSIM 将入射光的 4 个 Stokes 参量调制到单幅光谱强度图像上,通过对光谱强度信息进行解调,从而实现入射光偏振信息和光谱信息的复原^[7-8]。其原理如图 1 所示,入射光包含了 4 个 Stokes 参量且其偏振态与强度均随着波数而变化,依次通过由多级相位延迟器 R_1 、 R_2 和线偏振器 A 组成的偏振光谱调制模块,其中 R_1 和 R_2 的快轴方向与水平方向夹角分别为 0° 和 θ ($\theta \neq 0^\circ$),线偏振器 A 的透光轴与 R_1 的快轴平行。调制后的光谱从线偏振器 A 出射经过光谱系统后被探测器接收,探测器记录的光谱则为入射光的 Stokes 光谱分量被不同频率的余弦曲线调制后的线性叠加。再对已采集的数据进行傅里叶变换,通过合适的滤波和解调即可复原出不同分量的偏振光谱信息。

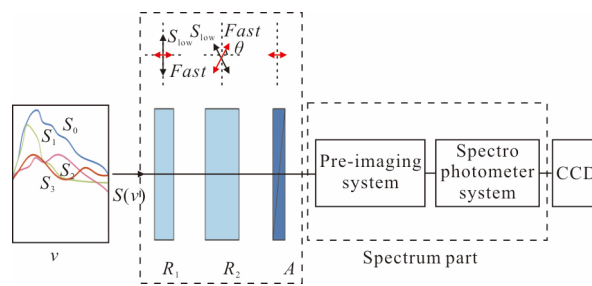


图 1 偏振光谱复原系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of polarization spectrum restoration system

2 傅里叶变换复原法

当入射光通过图 1 所示偏振光谱调制模块,出射光的 Stokes 参量与入射光的 Stokes 参量有如下关系:

$$S_{out} = M_{SM} \cdot S_{in} \quad (1)$$

$$M_{SM} = M_A \cdot M_{R_2} \cdot M_{R_1} \quad (2)$$

由公式(2)计算可得到:

式中: $\mu=(1-\cos\varphi_2(v)\sin2\theta_2(v)\cos2\theta_2(v)); \tau=\sin\varphi_2(v)\sin2\theta_2(v)$, v 为波数; φ_1 为通过相位延迟器 R_1 的相位差; φ_2 为通过相位延迟器 R_2 的相位差; θ_2 为 R_2 快轴方向与水平方向的夹角。为方便计算, 将 R_2 快轴方向设置成 45° , 即 $\theta_2=45^\circ$, 对任意入射 Stokes 光谱矢量 $S_{in}(v)=[s_0(v) s_1(v) s_2(v) s_3(v)]^T$, 可得到其出射 Stokes 光谱 $S_{out}(v)$, 由于探测器只能接收到光强, 因此实际测量接收的数据只有第一个分量, 即:

$$I(v)=\frac{1}{2}[s_0(v)+s_1(v)\cos\varphi_2(v)+s_2(v)\sin\varphi_1(v)\sin\varphi_2(v)-s_3(v)\cos\varphi_1(v)\sin\varphi_2(v)] \quad (4)$$

$$\varphi(v)=2\pi\Delta n(v)d \quad (5)$$

式中: $\Delta n(v)=n_o(v)-n_e(v)$ 为双折射晶体材料的双折射率; d 为延迟器 R 的物理厚度。一般情况下, $\Delta n(v)$ 是 v 的非线性函数, 将 $\Delta n(v)$ 在中心波数 v_0 处泰勒展开得到:

$$\Delta n(v)=\Delta n(v_0)+\left.\frac{d\Delta n(v_0)}{dv}\right|_{(v-v_0)}(v-v_0)+\frac{1}{2}\left.\frac{d^2\Delta n(v_0)}{dv^2}\right|_{(v-v_0)}(v-v_0)^2+\cdots=\Delta n_0+\Delta n_1(v) \quad (6)$$

式中: Δn_0 和 Δn_1 分别表示晶体材料双折射率的与波数无关项与相关项。为将不同 Stokes 光谱调制到不同的光程差 L 上, 则公式(5)中的相位延迟量可以表示为:

$$\varphi(v)=2\pi Lv+\Phi(v) \quad (7)$$

$$\Phi(v)=2\pi\Delta n_1 d v \quad (8)$$

$$L=\Delta n_0 d \quad (9)$$

为使低频的 Stokes 光谱信号控制高频的余弦载波信号从而进行光谱调制, 需将公式(4)各分量转化为余弦的表达式, 可令 $S_{23}(v)=S_2(v)+iS_3(v)$, 则有:

$$S_2(v)=|S_{23}(v)|\cos[\arg(S_{23}(v))] \quad (10a)$$

$$S_3(v)=|S_{23}(v)|\sin[\arg(S_{23}(v))] \quad (10b)$$

整理得到光强的表达式为:

$$I(v)=\frac{1}{2}s_0(v)+\frac{1}{2}s_1(v)\cos(2\pi L_2 v+\Phi_2)-\frac{1}{4}|s_{23}(v)|\cos[2\pi(L_2+L_1)v+\Phi_2+\Phi_1-\arg(S_{23}(v))]+\frac{1}{4}|s_{23}(v)|\cos[2\pi(L_2-L_1)v+\Phi_2-\Phi_1+\arg(S_{23}(v))] \quad (11)$$

由公式(11)可知, 目标光的 Stokes 参量分别被调制到载波频率 L_2 、 L_2+L_1 和 L_2-L_1 上, 因此可将调制光谱转换到光程差域, 对不同载波频率上的信息分别进行运算可复原出 Stokes 参量。对 $I(v)$ 进行逆傅里叶变换可以计算出其自相关函数, 即在光程差域的表达式为:

$$C(l)=C_0(l)+C_1(l-(L_2-L_1))+C_1^*(l+(L_2-L_1))+C_2(l-L_2)+C_2^*(l+L_2)-C_2(l-(L_2+L_1))-C_3^*(l+(L_2+L_1)) \quad (12)$$

式中: l 为光程差域变量; C_0 、 C_1 、 C_2 和 C_3 的表达式分别为:

$$C_0=\frac{1}{2}F^{-1}[S_0(v)] \quad (13a)$$

$$C_1=\frac{1}{8}F^{-1}[S_{23}(v)e^{i(\Phi_2(v)-\Phi_1(v))}] \quad (13b)$$

$$C_2=\frac{1}{4}F^{-1}[S_1(v)e^{i\Phi_2(v)}] \quad (13c)$$

$$C_3=\frac{1}{8}F^{-1}[S_{23}^*(v)e^{i(\Phi_2(v)-\Phi_1(v))}] \quad (13d)$$

如图 2 所示, 公式(12)的 7 个分量将在光程差域被分成 7 个通道, 通过光程差域滤波的方式获取其中第一、二和四项, 并进行傅里叶变换得到:

$$F(C_0)=\frac{1}{2}S_0(v) \quad (14a)$$

$$F(C_1)=\frac{1}{8}[S_2(v)+iS_3(v)]e^{i(\Phi_2(v)-\Phi_1(v))} \quad (14b)$$

$$F(C_2)=\frac{1}{4}S_1(v)+e^{i\Phi_2(v)} \quad (14c)$$

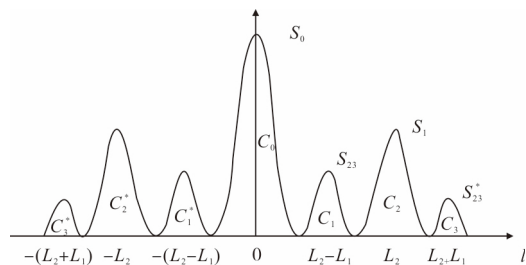


图 2 光程差域通道滤波示意图

Fig.2 Schematic diagram of channel filtering in the optical path difference domain

根据公式(14)分析, 当已知 $\varphi_1(v)$ 和 $\varphi_2(v)$, 则可计算出需要的 Stokes 光谱。由于 $\varphi_1(v)$ 和 $\varphi_2(v)$ 只与制作相位延迟器的材料和厚度有关, 而与被测光束的光谱偏振态无关, 因此, 可采用参考光束测量法预

先测定^[9-10]。为提高测量及计算效率,当采用 22.5°线偏振光为参考光束时,进入偏振光谱调制模块的 Stokes 光谱为:

$$S_1(v)=S_0(v)\cos^2(22.5^\circ)-S_0(v)\cos^2(67.5^\circ)=\frac{\sqrt{2}}{2} \quad (15a)$$

$$S_2(v)=2S_0(v)\cos(22.5^\circ)\cos(67.5^\circ)=\frac{\sqrt{2}}{2} \quad (15b)$$

由此可得到:

$$e^{i\Phi_2(v)}=2\sqrt{2}\frac{F(C_2, 22.5^\circ)}{F(C_1, 22.5^\circ)} \quad (16)$$

$$e^{i[\Phi_2(v)-\Phi_1(v)]}=4\sqrt{2}\frac{F(C_1, 22.5^\circ)}{F(C_0, 22.5^\circ)} \quad (17)$$

将公式(16)、(17)代入公式(14)最终可实现全 Stokes 光谱的复原:

$$S_0(v)=2F(C_0,) \quad (18a)$$

$$S_1(v)=\frac{4F(C_2)}{e^{i\Phi_2(v)}}=\frac{4F(C_2)}{2\sqrt{2}\frac{F(C_2, 22.5^\circ)}{F(C_0, 22.5^\circ)}}=\sqrt{2}\frac{F(C_2)\cdot F(C_0, 22.5^\circ)}{F(C_2, 22.5^\circ)} \quad (18b)$$

$$S_2(v)=\text{Re}\left[\frac{8F(C_1)}{4\sqrt{2}\frac{F(C_1, 22.5^\circ)}{F(C_0, 22.5^\circ)}}\right]=\text{Re}\left[\sqrt{2}\frac{F(C_1)\cdot F(C_0, 22.5^\circ)}{F(C_1, 22.5^\circ)}\right] \quad (18c)$$

$$S_3(v)=\text{Im}\left[\frac{8F(C_1)}{4\sqrt{2}\frac{F(C_1, 22.5^\circ)}{F(C_0, 22.5^\circ)}}\right]=\text{Im}\left[\sqrt{2}\frac{F(C_1)\cdot F(C_0, 22.5^\circ)}{F(C_1, 22.5^\circ)}\right] \quad (18d)$$

3 偏振光谱系统设计

3.1 光谱部分系统的设计

光谱部分系统的主要目的是能够实现在 400~1 000 nm 波段内光谱分辨率可达 2 nm 的分光成像。具体可根据光谱范围选定美国 ON Semiconductor 的 KAF-3200 探测器, CCD 相关参数以及详细的光学系统设计指标参数如表 1 所示。

光谱系统是由前置望远物镜系统和后端分光系统两部分组成,其中前置望远物镜是整个系统重要的组成部分,主要用于收集外界目标的能量信息和空间信息,其性能的好坏将直接影响目标图像质量

和系统的光谱分辨率。文中选用了透射式望远物镜作为前置光学系统,通过 ZEMAX 软件设计得到系统结构如图 3 所示。

表 1 光谱部分系统指标参数

Tab.1 Specification parameters of spectral system

Specifications	Values
Spectral range/nm	400~1 000
F number	4
FOV/(°)	6.83
Focal length/mm	150
Detector array size/pixel	2 184×1 472
Detector pixel size/μm	6.8
Spectral resolution/nm	2

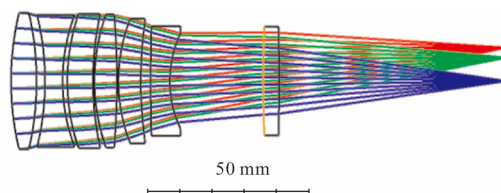


图 3 前置望远物镜结构图

Fig.3 Structure of the front telescope objective

分光(色散)系统是光谱仪光学系统的核心部分,决定着光谱仪的尺寸及性能。其主要作用是利用色散元件将前置望远物镜所成的复色像进行色散,由于光栅色散具有光谱线性度较好、光谱分辨率高的特点,且为了使得系统结构更加紧凑,文中设计采用以凸面光栅为色散元件的 Offner 结构型式,具体包括两个球面反射镜 M1 和 M3,一个凸面光栅 M2,其中 M1、M2 和 M3 拥有共同球心,曲率半径比为 2:1:2,是典型的三同心光学系统^[11-12]。系统特点是结构简单、畸变小、成像质量好,系统的三级和五级彗差均为零,对称的主镜和三镜可自动校正三级像散、场曲、子午离轴彗差,只剩下五级像散^[13]。根据已完成的前置望远物镜系统的设计,按照数值孔径、光瞳以及视场相匹配的原则,设计得到 Offner 分光系统的结构,如图 4 所示。

将上述两个系统拼接组合一起,对其在代表波长 400、650、1 000 nm 下进行像质评价,如图 5 所示。

从图中可看到各点列图 RMS 半径值均不超过 $3.4\ \mu\text{m}$ 可与探测器匹配良好。根据光栅线色散公式,由光栅常数 $10\ \mu\text{m}$,反射镜 M3 的焦距为 $54.9\ \text{mm}$,

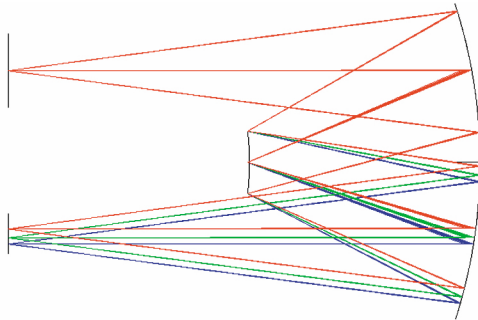


图 4 Offner 分光系统结构图

Fig.4 Structure of Offner dispersion system

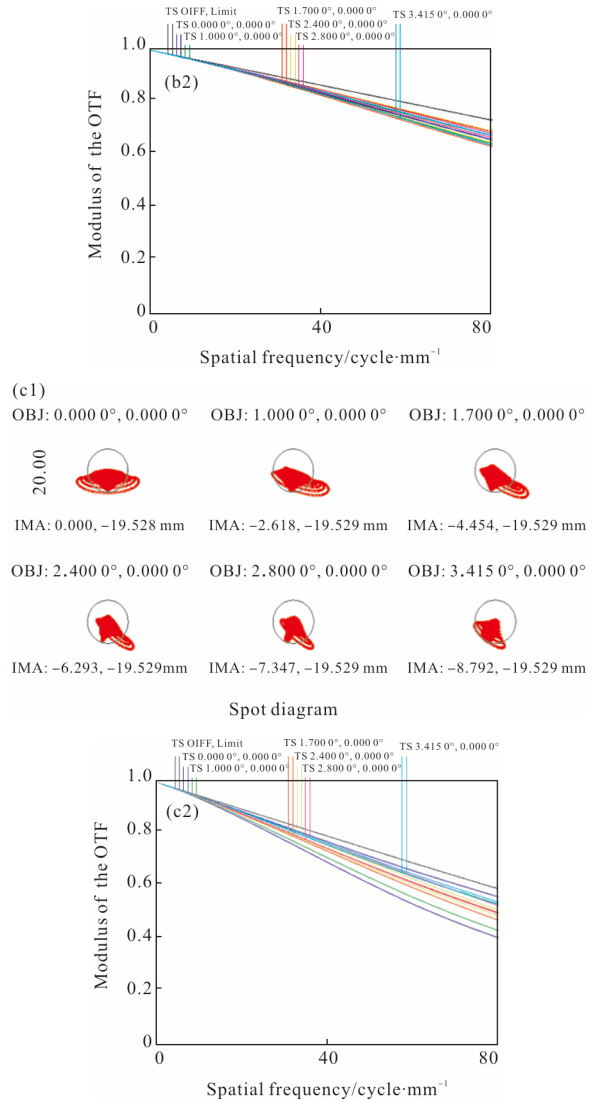
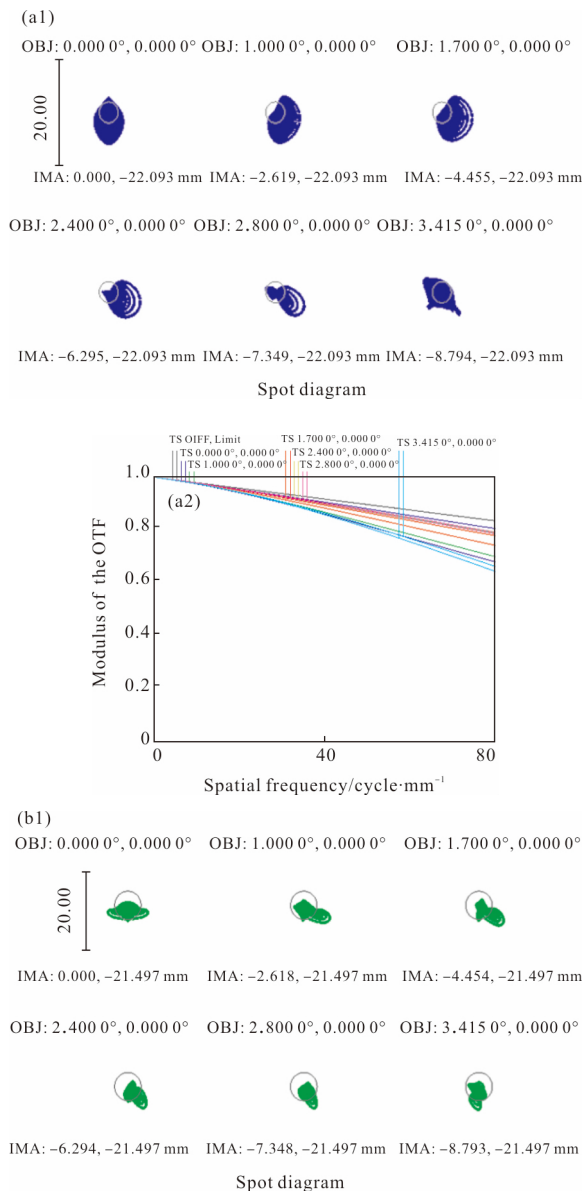


图 5 图(a)~(c) 波长 400、650、1 000 nm 下光谱系统的点列图和 MTF 曲线

Fig.5 Fig.(a)~(c) Spot diagram and MTF curves of spectral optical system at the wavelength of 400, 650, 1 000 nm

可计算得到光谱分辨率,满足分辨率 2 nm 的指标要求。如图 6 所示,在全视场下,从代表波长及与其

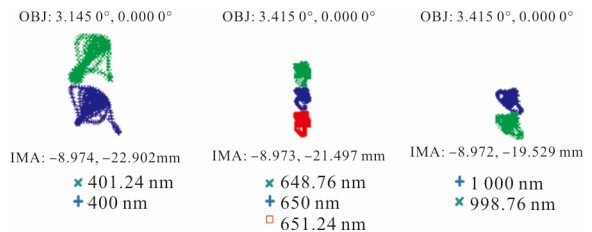


图 6 代表波长在 1.24 nm 光谱间隔下的点列图

Fig.6 Spot diagram of the representative wavelengths with 1.24 nm spectral intervals

1.24 nm 光谱间隔的点列图可清晰分离同样说明了设计结果达到指标要求。

3.2 偏振光谱调制模块的设计分析

由于延迟器的厚度将决定载波信号的调制频率, 所以偏振光谱调制模块设计的关键就在于两片延迟器厚度的确定, 典型的厚度比值为 1:2^[14], 即 $d_1:d_2=1:2$ 。根据 PSIM 原理可知, 光谱仪带宽至少为各通道带宽的 7 倍才能满足光谱采样需求, 因此, 根据光谱仪的光谱分辨率得到 d_1 需要满足的条件为:

$$d_1 \leq \frac{\lambda^2}{7\Delta n \cdot \Delta\lambda} \quad (19)$$

式中: Δn 为延迟器材料的双折射率, 该系统选用石英材料, 取 $\Delta n=0.0092$ 。由于不同波长处光谱仪的分辨率不同, 为保证所有波长均满足光谱采样需求, 应使用工作波段内的最小波长进行分析计算。此外为满足应用需求, 由延迟器厚度决定的偏振光谱分辨率应该高于所需要的偏振光谱分辨率, 则 d_1 要满足的条件为^[15]:

$$d_1 \geq \frac{N}{\Delta\nu \cdot \Delta n} \quad (20)$$

式中: N 表示在波数范围内可分辨偏振信息的波段数, 为在一次测量中获取尽可能多的偏振信息波段, 由公式(19)、(20)得到 $N_{\max}=27$, 此时计算延迟器厚度可取 $d_1=2\text{ mm}$, 相应的 $d_2=4\text{ mm}$ 。最终得到偏振光谱信息复原光学系统的整体结构如图 7 所示。

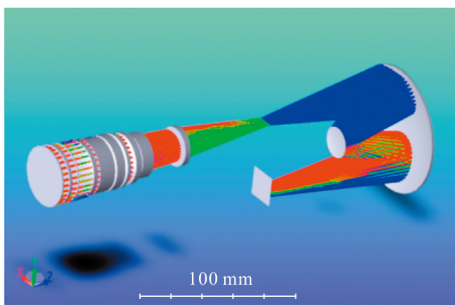


图 7 整体光学系统结构图

Fig.7 Structure of the overall optical system

4 实验验证

为验证偏振光谱调制模块设计的合理性及偏振光谱信息复原的正确性, 通过搭建如图 8 所示实验装置, 以 30° 线偏振光作为目标光入射通过偏振光谱调制模块, 得到波长均匀采样与波数均匀采样的

调制光谱强度如图 9 所示。

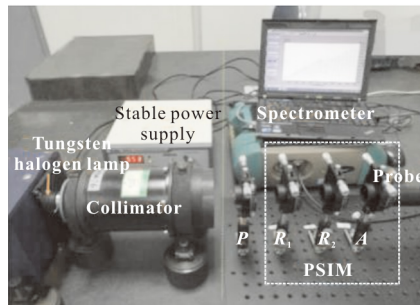
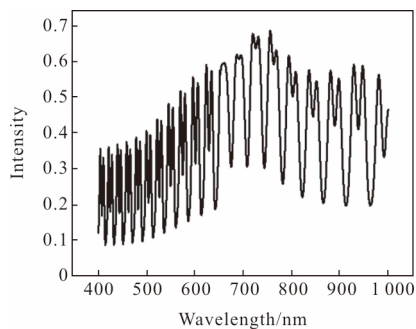


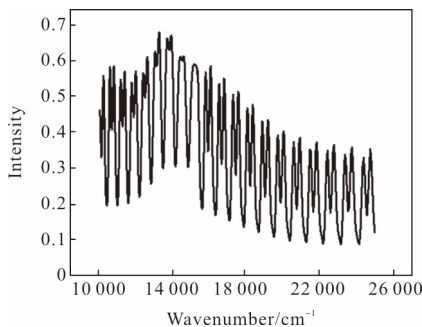
图 8 实验装置图

Fig.8 Diagram of experimental device



(a) 波长均匀采样

(a) Uniform sampling in wavelength



(b) 波数均匀采样

(b) Uniform sampling in wavenumber

图 9 调制光谱强度图

Fig.9 Intensity of the modulated spectrum

从理论上计算分析 30° 理想线偏振光的归一化 Stokes 参数应该为 $S=[1\ 1/2\ \sqrt{3}/2\ 0]^T$, 其偏振度为 1。按照文中叙述的傅里叶变换解调法对光谱强度数据进行处理, 得到如图 10 所示的归一化 Stokes 参数, 从图中可以看出: 复原数据与理论数据偏差很小, 为直观体现, 绘制偏振度误差曲线如图 11 所示, 其中复原偏振度与理论偏振度的最大偏差为 -1.04×10^{-5} 。

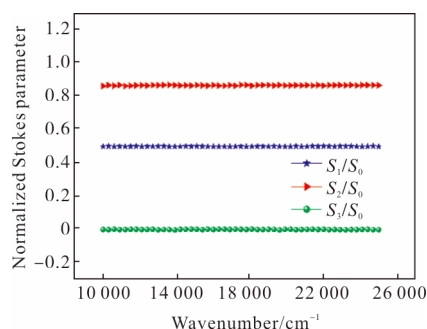


图 10 目标斯托克斯光谱复原结果

Fig.10 Restoration results of the Stokes spectrum of the target

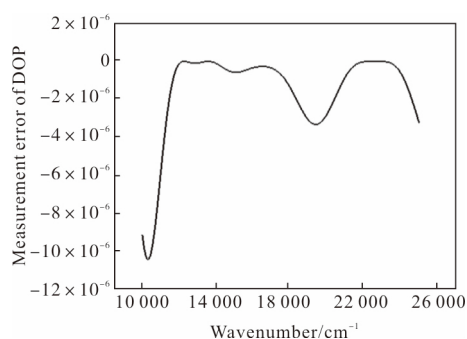


图 11 复原结果与理论结果的偏振度偏差

Fig.11 Deviation of the degree of polarization between the restoration result and the theoretical result

5 结 论

文中阐述了基于PSIM实现偏振光谱复原的原理及系统的基本结构,并依照傅里叶变换解调法对其复原进行了计算推导,结果可得到不同谱段的全Stokes参量。结合实际需求利用光学设计软件对光谱仪光学系统进行了模块化设计分析,并根据参数匹配设计了偏振光谱调制模块,最终通过实验验证了模块设计的合理性,并能正确复原入射光的偏振光谱信息,为进一步理论研究和仪器设计提供了重要的指导意义。

参考文献:

[1] Sellar R G, Boreman G D. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(1): 013602.

[2] Craven-Jones J, Kudenov M W, Stapelbroek M G, et al. Infrared hyperspectral imaging polarimeter using

birefringent prisms [J]. *Applied Optics*, 2011, 50 (8): 1170-1185.

[3] Li Shujun, Jiang Huilin, Zhu Jingping, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection technology [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803-809. (in Chinese)

李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 803-809.

[4] Li Jie, Zhu Jingping, Qi Chun, et al. Large-aperture static hyperspectral full polarization imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 574-578. (in Chinese)

李杰, 朱京平, 齐春, 等. 大孔径静态超光谱全偏振成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 574-578.

[5] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(22): 5453-5469.

[6] Oka K, Kato T. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum [J]. *Optics Letters*, 1999, 24 (21): 1475-1477.

[7] Wang Xinquan, Xiangli Bin, Huang Wen, et al. Research and simulation of intensity modulation-fourier transform spectral polarization technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(7): 1980-1984. (in Chinese)

王新全, 相里斌, 黄旻, 等. 强度调制-傅里叶变换光谱偏振技术研究与仿真 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(7): 1980-1984.

[8] Wang Dong, Yan Changxiang, Zhang Junqiang, et al. High-precision adjustment method of spectral polarization modulator [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 144-154. (in Chinese)

王东, 颜昌翔, 张军强, 等. 光谱偏振调制器的高精度装调方法[J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 144-154.

[9] Taniguchi A, Okabe H, Oka K, et al. Stabilization of a channeled spectropolarimeter by self-calibration [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(22): 3279-3281.

[10] Yang B, Ju X, Yan C, et al. Alignment errors calibration for a channeled spectropolarimeter[J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 28923.

- [11] Vujkovicvijin P, Goldstein N, Fox M J, et al. Adaptive spectral imager for space-based sensing[C]// SPIE, 2006, 6206: 62063X.
- [12] Wu Congjun, Yan Changxiang, Liu Wei, et al. Optical design of subfield-of-view imaging spectrometer based on Offner structure [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(8): 2272-2276. (in Chinese)
吴从均, 颜昌翔, 刘伟, 等. 基于 Offner 结构分视场成像光谱仪光学设计 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8): 2272-2276.
- [13] Huang Xujie, Yan Yangming, Pan Qiao, et al. Optical design of multi-angle polarization imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (11): 1118002. (in Chinese)
黄绪杰, 靳阳明, 潘俏, 等. 多角度偏振成像光谱仪的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 1118002.
- [14] Hagen N, Oka K, Dereniak E L. Snapshot Mueller matrix spectropolarimeter: erratum. [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(10): 1675-1675.
- [15] Song Zhiping, Hong Jin, Qiao Yanli. System design of intensity modulation polarization spectrometer [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]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2325-2331.