

调制型偏振成像技术

代 虎, 李丹明, 李居平, 郭 睿, 贾露娟

兰州空间技术物理研究所, 甘肃 兰州 730000

摘要 传统的偏振成像技术存在偏振成像实时性差、多光谱偏振成像困难和无法实现高光谱偏振成像等问题。针对这些问题,提出了一种新的基于信号调制解调理论的偏振成像理论,并根据该理论提出了一种基于光栅色散的光谱调制型高光谱偏振成像仪。该偏振成像仪首先测得被偏振调制过的光谱信号,再经过频域滤波与反演计算获得高光谱图像与偏振图像,因此该偏振成像仪可实现高光谱全偏振成像,并且可将高光谱成像与偏振成像完美融合。通过仿真实验验证了所提偏振成像仪在理论上的正确性。

关键词 物理光学; 高光谱偏振成像; 光谱调制; 高阶波片; 光栅色散

中图分类号 O436.3; TH744 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.062602

Modulated Polarization Imaging Technique

Dai Hu, Li Danming, Li Juping, Guo Rui, Jia Lujuan

Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, Gansu 730000, China

Abstract Traditional polarization imaging techniques have a series of problems, such as the poor performance of real-time polarization imaging, the difficulty to realize the multi-spectral polarization imaging, and the impossibility to realize the hyper-spectral polarization imaging. In order to overcome these problems, a new theory of polarization imaging is proposed based on the signal modulation-demodulation theory. According to the proposed theory, a hyper-spectral polarization imager based on grating dispersion is proposed. The spectrum signal after polarization modulation is obtained by the polarization imager, and the hyper-spectral image and the polarization image are obtained by means of frequency-domain filtering and inversion calculation. Hence, the polarization imager can achieve hyper-spectral total polarization imaging. The polarization imaging and the hyper-spectral imaging are well combined faultlessly. The theoretical validity of the proposed polarization imager is testified through the simulation experiment.

Key words physical optics; hyper-spectral polarization imaging; spectroscopy modulation; high-order wave plate; grating dispersion

OCIS codes 260.5430; 050.2770; 300.6380

1 引言

获取目标场景的偏振信息能够提高目标对比度和减小杂散光干扰,有助于目标的探测和识别,同时能够提供目标表面形状、纹理、朝向和粗糙度等特征信息^[1]。随着应用需求的日益提高,对景物空间偏振信息的测量变得越来越重要。目前,偏振信息的测量主要应用于遥感遥测和混乱背景中的目标探测。偏振探测的应用领域也非常广阔,在云与大气气溶胶的探测、地质勘探、找矿、土壤分析、环境监测、资源调查、农作物估产、海洋开发利用、灾害估计、农林牧业发展、军事侦察应用、天体探测及生物医药等领域都有重要的应用价值^[2]。

在偏振成像系统中,利用偏振分析器件可实现光波偏振态的解析,常用的偏振器件有波片和偏振片。传统的偏振态测量理论假设光的偏振态在测量域内不发生改变,由不同偏振分析器主轴和对应测得的光强序

收稿日期: 2016-11-15; **收到修改稿日期:** 2017-02-07

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2011AA12A103)

作者简介: 代 虎(1985—),男,博士,工程师,主要从事空间偏振遥感与光谱遥感方面的研究。

E-mail: daihulove1@126.com

列构建线性方程组,通过解方程组求得光束的斯托克斯矢量。基于这种理论的偏振成像仪有旋转波片式斯托克斯偏振成像仪^[3]、相位可变液晶波片式斯托克斯偏振成像仪^[4]、分焦面斯托克斯偏振成像仪^[5]、分孔径斯托克斯偏振成像仪和分振幅斯托克斯偏振成像仪等。传统的偏振成像方法原理简单,容易实现,但是也存在缺陷。当光束的偏振态在测量域内发生变化时,这种测量方法存在原理误差,在分振幅、分孔径和分焦面斯托克斯偏振成像仪中表现为空间对准误差^[6]。

为了克服这一原理性的偏振测量误差,提出一种新的基于信号调制解调的偏振成像理论,通过偏振调制器件将偏振信息调制到时域、空域或光谱域,再利用频率分析的方法将偏振信号解调出来,从而实现偏振信息的获取。同时,根据此偏振成像理论,提出了一种基于光栅色散的高光谱偏振成像技术,该技术具有高光谱全偏振成像能力,可真正实现高光谱成像技术与偏振成像技术的完美融合。

2 偏振成像新理论

设光束的斯托克斯矢量为 $\mathbf{S}(\tau)$,偏振分析器的 Mueller 矩阵的第一行元素构成的列向量为 $\mathbf{A}(\tau)$,则光束经过偏振分析器后的光强度为

$$I(\tau) = \mathbf{A}(\tau)^T \cdot \mathbf{S}(\tau). \quad (1)$$

从信号处理的角度来看,(1)式是一个典型的信号调制公式。 $\mathbf{S}(\tau)$ 为被调制信号, $\mathbf{A}(\tau)$ 为调制信号, τ 为调制域。光电探测器只能测得一个时间维和两个空间维的光强信号,在利用干涉或者色散的情况下可以将一个空间维度转变为光谱维度,并将光谱维度用于测量光谱信号,因此,理论上可以实现偏振信息在时间域、空间域^[7-8]或光谱域^[9]的调制。鉴于光谱维是通过干涉或色散转化而来的,光谱调制型偏振成像仪中需要有色散或干涉功能的组件。

偏振成像仪的目的是获取目标场景入射光的斯托克斯矢量 $\mathbf{S}(\tau)$,因此求取 $\mathbf{S}(\tau)$ 的过程对应着信号处理中的解调过程。对(1)式进行傅里叶变换可以得到

$$\tilde{I}(f) = C_0(f) + \sum_{i=1}^3 C_i(f - f_i) + \sum_{i=1}^3 C_i^*(-f - f_i), \quad (2)$$

式中 $C_i(f)$ 为斯托克斯参数 $S_i(\tau)$ 的傅里叶变换式的线性组合, $C_i^*(f)$ 为 $C_i(f)$ 的共轭, f_i 为频率。从(2)式中可以看出,经过偏振调制单元后,斯托克斯参数会被调制在不同的中心频率上,因此合理设置偏振调制单元的调制频率,使4个斯托克斯参数在频域分离,就可以通过频域滤波的方法求得入射光波的斯托克斯矢量。

本质上,测量斯托克斯矢量的过程为:1)通过偏振调制单元(偏振分析器)对入射光束进行偏振调制,产生一个被调制的光强信号;2)通过信号采样单元获得被调制信号的光强序列或频谱序列;3)通过频域滤波的方式获得入射光的斯托克斯矢量。因此,偏振仪的设计实质上是设计一个偏振信号调制单元以及与之对应的信号采样单元。

通过合理设置偏振调制单元的调制频率,使4个斯托克斯参数在频域被分离,通过频域滤波的方法即可得到斯托克斯参数。调制频率将4个斯托克斯参数完全分离的条件是斯托克斯参数的频率低于调制频率的分离极限。

假设调制频率满足 $f_1 < f_2 < f_3$,那么斯托克斯参数的最高频率 f_H 应满足

$$f_H \leq f_c, \quad (3)$$

$$f_c = \text{Min}\{f_1, f_2 - f_1, f_3 - f_2\}, \quad (4)$$

式中 $\text{Min}\{\cdot\}$ 表示取最小值, f_c 为偏振分析器的截止频率。如果斯托克斯参数的频率高于截止频率,斯托克斯参数在频域将会发生重叠,最终的斯托克斯矢量反演将无法避免高频混叠。令相位因子调制步长为 $\Delta\tau$,则偏振仪的光强采样频率为

$$f_s = 1/\Delta\tau. \quad (5)$$

根据奈奎斯特定理,信号采样单元的采样频率应不小于2倍的偏振分析器的截止频率。但是在实际的应用中,为了保证斯托克斯参数在频域能够完全展开并且充分利用采样频率,通常使采样频率满足

$$f_s = 2(f_3 + f_c). \quad (6)$$

3 基于光栅色散的偏振成像技术

依据偏振成像理论,提出一种基于光栅色散的高光谱偏振成像系统。该系统包括望远镜系统、狭缝、准直镜、偏振调制单元和偏振采样单元,系统示意图如图 1 所示。偏振调制单元由两个快轴方向分别为 0° 和 45° 的波片(R1 和 R2)以及透光轴为 0° 的检偏器构成。偏振采样单元由光栅、成像透镜和焦平面阵列(FPA)组成。通常用到的波片是消色差波片,即在较宽的波段范围内波片的相位延迟量为常量,但是在光谱调制型斯托克斯偏振仪中使用的波片是高阶波片,高阶波片的特点是波片的相位延迟量随波数的变化而快速变化,从而实现光束偏振态的光谱调制。从狭缝出射的光束经过准直镜准直后进入偏振调制单元,经调制后每个斯托克斯参数带有不同频率的相位因子,最终光束经光栅色散和成像透镜在面阵焦平面上成像。面阵焦平面的二维数据分别记录空间信息和光谱信息,偏振参数被调制在光谱信息中。这里采用光栅作为色散元件,光栅具有色散线性度好、光路结构简单、成像质量好和光能利用率高等优势。

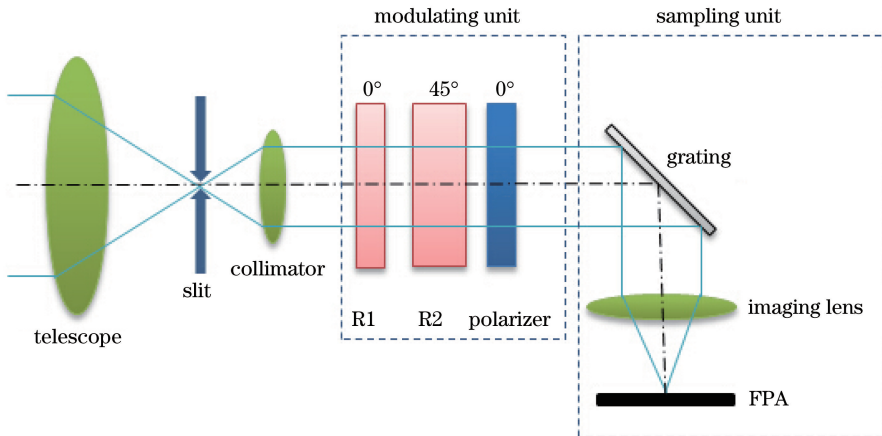


图 1 基于光栅色散的偏振成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of polarization imaging system based on grating dispersion

根据 Mueller 矩阵计算方法,得到焦平面阵列的光谱维出射光束的波数-光强分布为

$$I(\sigma) = \frac{1}{2}s_0(\sigma) + \frac{1}{2}s_1(\sigma)\cos[\phi_2(\sigma)] + \frac{1}{2}s_2(\sigma)\sin[\phi_2(\sigma)]\sin[\phi_1(\sigma)] - \frac{1}{2}s_3(\sigma)\sin[\phi_2(\sigma)]\cos[\phi_1(\sigma)], \quad (7)$$

式中 σ 为波数, $s_k(\sigma)$ 为 ($k=0,1,2,3$) 光波的斯托克斯参量, $\phi_1(\sigma)$ 和 $\phi_2(\sigma)$ 分别为厚度为 d_1 的波片 R1 和厚度为 d_2 的波片 R2 的相位延迟量。厚度为 d_i ($i=1,2$) 的波片产生的相位延迟量与波数的关系为

$$\phi_i(\sigma) = 2\pi L_i \sigma, \quad (8)$$

式中 L_i 为波片引入的光程差。将(8)式代入(7)式可得

$$I(\sigma) = \frac{1}{2}s_0(\sigma) + \frac{1}{4}|s_{23}(\sigma)|\cos\{2\pi(L_1 - L_2)\sigma + f_{\text{arg}}[s_{23}(\sigma)]\} + \frac{1}{2}s_1(\sigma)\cos(2\pi L_2\sigma) - \frac{1}{4}|s_{23}(\sigma)|\cos\{2\pi(L_1 + L_2)\sigma + f_{\text{arg}}[s_{23}(\sigma)]\}, \quad (9)$$

式中

$$s_{23}(\sigma) = s_2(\sigma) - is_3(\sigma), \quad (10)$$

$f_{\text{arg}}(\cdot)$ 为取平均值。

由(9)式可以看出,两个波片分别对入射光的斯托克斯参数的调制具有不同的相位因子,且光程差与波数是一对傅里叶变换域,因此仍然可以利用光程差域滤波的方法解调出斯托克斯参数。对(9)式进行傅里叶变换可得

$$\tilde{I}(h) = \frac{1}{2}A_0(h) + \frac{1}{4}A_1(h - L_2) + \frac{1}{4}A_1^*(-h - L_2) +$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{8}A_2[h - (L_1 - L_2)] + \frac{1}{8}A_2^*[-h - (L_1 - L_2)] - \\ & \frac{1}{8}A_3[h - (L_1 + L_2)] - \frac{1}{8}A_3^*[-h - (L_1 + L_2)], \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $A_0(h)$ 为 $s_0(\sigma)$ 的傅里叶变换, $\frac{1}{4}A_1(h - L_2) + \frac{1}{4}A_1^*(-h - L_2)$ 为 $\frac{1}{2}s_1(\sigma)\cos(2\pi L_2\sigma)$ 的傅里叶变换, $\frac{1}{8}A_2[h - (L_1 - L_2)] + \frac{1}{8}A_2^*[-h - (L_1 - L_2)]$ 为 $\frac{1}{4}|s_{23}(\sigma)|\cos\{2\pi(L_1 - L_2)\sigma + f_{\text{arg}}[s_{23}(\sigma)]\}$ 的傅里叶变换, $\frac{1}{8}A_3[h - (L_1 + L_2)] - \frac{1}{8}A_3^*[-h - (L_1 + L_2)]$ 为 $\frac{1}{4}|s_{23}(\sigma)|\cos\{2\pi(L_1 + L_2)\sigma + f_{\text{arg}}[s_{23}(\sigma)]\}$ 的傅里叶变换, h 为光程差。由(11)式可以看出 4 个斯托克斯参数分别分布在以 $0, \pm L_2, \pm(L_1 - L_2)$ 和 $\pm(L_1 + L_2)$ 为中心的光程差域。根据光程差域滤波能够方便地得到(11)式中的任意分量。

令(11)式右侧的第 1, 2, 4 项的傅里叶逆变换分别为 $F_1(\sigma)$ 、 $F_2(\sigma)$ 和 $F_4(\sigma)$, 则通过求解(11)式, 即可得到所有的斯托克斯参数, 即

$$\begin{cases} F_1(\sigma) = \frac{1}{2}s_0(\sigma) \\ F_2(\sigma) = \frac{1}{4}s_1(\sigma)\exp[i\phi_2(\sigma)] \\ F_4(\sigma) = \frac{1}{8}[s_2(\sigma) - is_3(\sigma)]\exp\{i[\phi_1(\sigma) - \phi_2(\sigma)]\} \end{cases} \quad (12)$$

4 基于光栅色散的偏振成像技术仿真验证

为了验证基于光栅色散的偏振成像技术在理论上的可行性, 设计了仿真实验对其进行验证。假设入射光波的斯托克斯参量如图 2 所示, 波片 R1 与 R2 的相位延迟量分别设置为 $100 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$, 光谱采样单元的光谱分辨率为 10 nm 。经过光谱偏振调制单元的调制后, 入射光的光强-光谱分布如图 3 所示。由图 3 可以看出, 入射光的强度在光谱域被调制。图 4 为光谱调制后光强信号的频谱图, 从图中可以明显看出, 入射光信号被调制在 7 个不同的中心频率 ($0, \pm 0.1, \pm 0.2, \pm 0.3 \text{ mm}$) 上, 整个频带的宽度由光谱采样频率决定, 频带宽度为 1 mm 。由(6)式可知, 两个波片的快轴方向决定光强调制的数学形式, 波片的相位延迟量决定偏振调制单元的调制频率, 光谱分辨率决定了被调制的光谱信号的频带宽度。为了充分利用光谱分辨率对应的频带宽度, 需要合理设置波片的相位延迟量, 以充分利用频带宽度, 使系统的截止频率尽可能的高, 从而减小高频信号的损失。通过频域信号滤波得到 $F_1(\sigma)$ 、 $F_2(\sigma)$ 和 $F_4(\sigma)$, 并将 $F_1(\sigma)$ 、 $F_2(\sigma)$ 和 $F_4(\sigma)$ 代入(11)式, 解调出被调制信号 $s_0(\sigma)$ 、 $s_1(\sigma)$ 、 $s_2(\sigma)$ 和 $s_3(\sigma)$ 。图 5 为入射光斯托克斯参量与解调得到的斯托克斯参量, 图中实线代表入射光偏振态, * 代表解调得到的偏振态。通过将解调出的 $s_0(\sigma)$ 、 $s_1(\sigma)$ 、 $s_2(\sigma)$

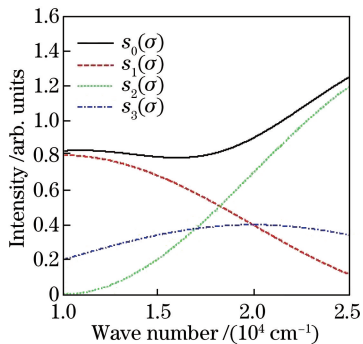


图 2 入射光波的斯托克斯参量

Fig. 2 Stokes parameters of incident light

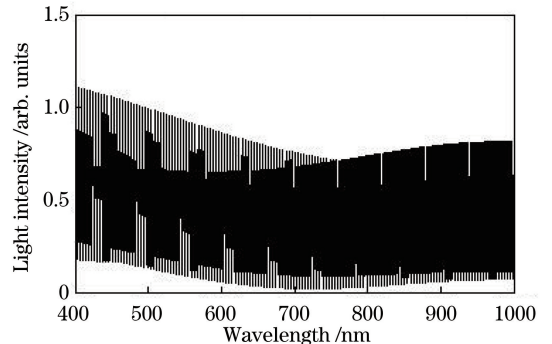


图 3 光谱偏振调制之后的光强分布

Fig. 3 Distribution of light intensity after spectrum polarization modulation

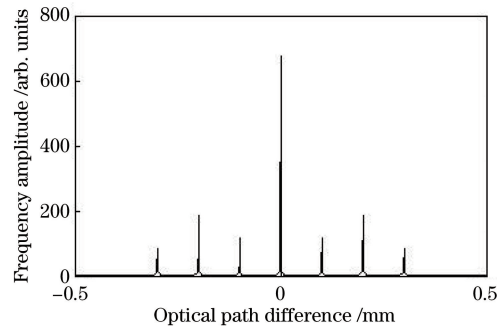


图4 光谱调制后光强信号的频谱图

Fig. 4 Spectrogram of light intensity signal after spectrum modulation

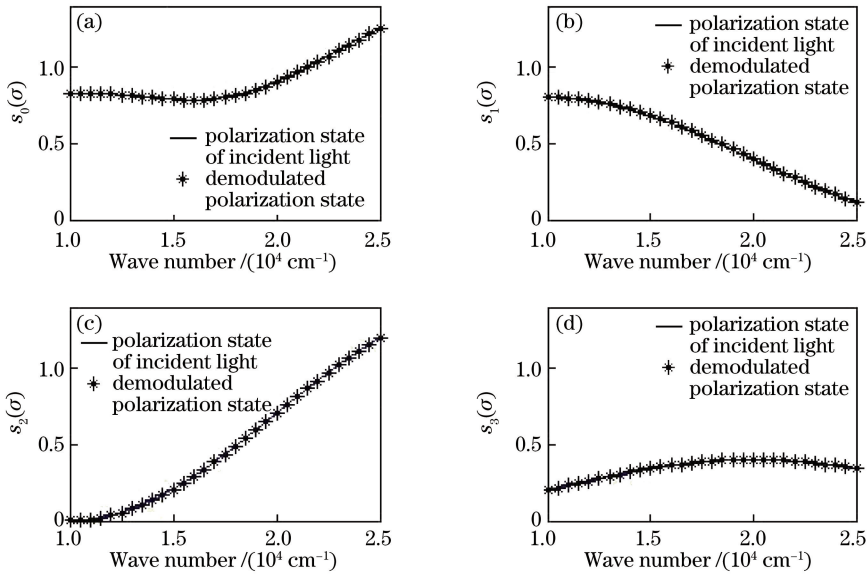
图5 入射光斯托克斯参量与解调得到的斯托克斯参量。(a) $s_0(\sigma)$; (b) $s_1(\sigma)$; (c) $s_2(\sigma)$; (d) $s_3(\sigma)$

Fig. 5 Stokes parameters of incident light and demodulated Stokes parameters.

(a) $s_0(\sigma)$; (b) $s_1(\sigma)$; (c) $s_2(\sigma)$; (d) $s_3(\sigma)$

和 $s_3(\sigma)$ 与模拟的入射偏振态光谱分布进行比较,可以发现解调出的偏振信号与入射光的偏振信息具有非常好的一致性。因此,仿真结果验证了所提出的基于光栅色散的偏振成像技术在理论上具有可行性。

5 结 论

针对传统偏振成像方法存在时间对准误差和空间对准误差等问题,提出了一种新的基于信号调制解调理论的偏振成像理论,该理论能够很好地克服传统偏振成像方法的原理缺陷,避免使用旋转和电控调制部件,提高了偏振成像系统的成像质量和偏振精度。根据新的偏振成像理论,提出了一种基于光栅色散的偏振成像技术,该技术能够实现高光谱全偏振成像,使高光谱成像与全偏振成像完美融合。设计仿真实验验证了这种高光谱全偏振成像技术在理论上的可行性,为下一步的原理样机研制打下坚实的理论基础。

参 考 文 献

- [1] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. Applied Optics, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [2] Dai Hu, Yan Changxiang, Wu Congjun. Azimuth optimization of polarizers for the aerosol polarimeter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(4): 1243-1248.
代 虎, 颜昌翔, 吴丛均. 气溶胶偏振探测仪检偏器方位角优化 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1243-1248.
- [3] Zhang Xuebing, Li Yanqiu, Zheng Meng, *et al.* Calibration and error compensation of an imaging Stokes polarimeter

based on rotating quarter-wave plate method[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0708007.

张雪冰, 李艳秋, 郑 猛, 等. 旋转波片法成像斯托克斯偏振仪误差标定和补偿[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708007.

- [4] Zhang Ying, Zhao Huijie, Cheng Xuan, *et al.* Design of full-polarized and multi-spectral imaging system based on LCVR[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(5): 1375-1378.

张 颖, 赵慧洁, 程 宣, 等. 基于 LCVR 调谐的全偏振多谱段成像系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(5): 1375-1378.

- [5] Tyo J S. Hybrid division of aperture/division of a focal-plane polarimeter for real-time polarization imagery without an instantaneous field-of-view error[J]. Optics Letters, 2006, 31(20): 2984-2986.

- [6] Dai H, Yan C X. Measurement errors resulted from misalignment errors of the retarder in a rotating-retarder complete Stokes polarimeter[J]. Optics Express, 2014, 22(10): 11869-11883.

- [7] 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.

- [8] Wu Junfang, Liu Hanchen. Influence of transmissivity in Savart polariscope on throughput of spatially modulated polarization interference imaging spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 93-96.

吴俊芳, 刘汉臣. Savart 偏光镜的透射率对空间调制偏振干涉成像光谱仪通量的影响[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 93-96.

- [9] Li Jie, Zhu Jingping, Qi Chun, *et al.* Static Fourier-transform hyperspectral imaging full polarimetry[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 044206.

李 杰, 朱京平, 齐 春, 等. 静态傅里叶变换超光谱全偏振成像技术[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 044206.