

主动偏振成像的系统结构概述

王霞^{1,2}, 张明阳², 陈振跃², 拜晓锋¹, 金伟其²

- (1. 微光夜视技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065;
2. 北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 偏振成像技术是近年来国内外研究的热点, 在军事和民用方面都有巨大的应用价值。与被动偏振成像方式相比, 主动偏振成像技术弥补了被动成像单纯依靠目标自身辐射或反射成像的不足, 大大提高了成像距离和信噪比。引入主动光源, 可以根据目标的出射辐射计算其 Mueller 矩阵, 分析目标反射或散射光的强度、相干、消偏振等特性, 进而得到目标的自身特性。介绍了近年来主动成像技术的发展; 分析了系统结构组成及工作原理; 最后给出了几种典型的主动偏振成像系统, 并分析了这些系统的优缺点, 指出了偏振成像系统的未来发展趋势。

关键词: 偏振成像; 主动成像; 系统结构

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2244-08

Overview on system structure of active polarization imaging

Wang Xia^{1,2}, Zhang Mingyang², Chen Zhenyue², Bai Xiaofeng¹, Jin Weiqi²

- (1. Key Laboratory for Low Light Level Technology of Commission of Science Technology and Industry for National Defense, Xi'an 710065, China; 2. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Active polarization imaging technology is a hot research field in recent years both at home and abroad, which has great value in terms of military and civilian aspects. Compared with passive imaging technology, active polarization imaging technology can remedy the deficiencies of imaging completely relying on the radiation or reflection from the target. As a result, the imaging distance and signal to noise ratio of the image can be greatly improved. Besides, by adding a light source with its parameters known, the Muller matrix of the target can be calculated according to the incident light and the output. Furthermore, the characteristics of intensity, coherence and depolarization of the light emitted or reflected from the target can be analyzed. The development of active polarization imaging technology, as well as system structure and principle were introduced. In addition, several typical polarization imaging systems, as well as their advantages and disadvantages, were presented. At the end, the future of active polarization imaging was predicted.

Key words: polarization imaging; active imaging; system structure

收稿日期: 2012-12-20; 修订日期: 2013-01-25

基金项目: 微光夜视技术国防科技重点实验室基金(J20110503)

作者简介: 王霞(1972-), 女, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为光电检测、光谱分析及微光与红外成像。

Email: angelniuniu@bit.edu.cn

0 引言

通常的光学系统根据光强的差别来区分目标,但当背景杂乱、强度差别不明显时,用强度来区分目标就比较困难,而采用光的偏振特性可以克服光强差太小所带来的问题,有效地识别目标。偏振是光的固有特性之一,任何目标在反射、散射和电磁辐射的过程中都会产生由其自身性质决定的特征偏振,即光偏振状态的变化反映了目标的物理信息。偏振信息可以表征目标的表面特征、形状、折射率和粗糙度^[1],同时偏振信息与光谱及强度信息的相关性较弱,因此有很大潜力改善成像性能,有助于提高目标探测和地物识别的准确度^[2]。当前,偏振成像技术已应用于遥感^[3]、显微成像、光学监测等诸多领域。

由于主动成像系统不受外界因素的影响,且 Mueller 矩阵成像系统可以根据目标反、散射前后光的状态变化得到目标的自身特性,主动照明偏振成像技术已成为国内外研究的重点。采用激光作主动光源,可以增加成像距离,同时由于激光可提供单一波长成像光束,极大提高系统信噪比,改善图像质量。激光雷达偏振成像技术作为新型遥感探测技术,增加了目标的信息量,在遥感和军事领域有重要的应用价值。

近年来,主动偏振成像技术发展较为迅速,很多学者对此进行了深入研究。Pezzaniti^[4]、Chipman^[5]和 Clémenceau 等人^[6]获取了传输过程中样品的 Mueller 矩阵图像;Goldstein^[7]、Priest^[8]测量了不同反射率表面的 Mueller 矩阵;Réfrégiera^[9]对主动偏振成像的对比度参数和主动相干系统中的偏振度进行了估计^[10]等。主动偏振成像在生物医学和工业检测中应用较多,Bueno^[11]测量了人眼的偏振特性;Laude-Boulesteix^[12]对着色的肝组织成像,进行了病理学研究;Morel^[13]利用主动成像系统对金属表面进行了三维重建实现目标的三维检测;Antonelli^[14]用 Mueller 矩阵成像实现了恶性肿瘤检测等。

1 主动偏振成像的基本原理与结构组成

1.1 主动偏振成像系统的基本原理

主动偏振成像通过一系列不同偏振状态的光对

目标和背景进行照明,然后测量从目标散射回来的光的偏振状态。当光与物质相互作用时,出射光束的四个 Stokes 参量与入射光束的四个 Stokes 参量成线性函数关系,如公式(1)所示。

$$\vec{S}_{out} = M\vec{S}_{in} \quad (1)$$

式中: M 是一个 4×4 阶矩阵,表征了包括退偏振、衰减和延迟等所有目标引起的偏振影响,称为 Mueller 矩阵。利用 Mueller 矩阵可以分析目标对入射光的消偏振特性,进而分析目标散射特性及内部机理,同时可以利用偏振度对目标成像。Mueller 矩阵不仅依赖于目标参量(如材料、表面粗糙度),而且依赖于入射光波长、入射角及测量仪器的特性(孔径、观测方位)。偏振度和强度用 Mueller 矩阵的各个元素表示为:

$$P_d = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 m_{ij}^2 - m_{00}^2}{3m_{00}^2}}, \quad I = m_{00} \quad (2)$$

主动偏振成像系统的光源是已知且可控的,只有主动偏振成像才能测得目标的 Mueller 矩阵。S. Breugnot^[15]通过实验证明,在只研究目标对入射光的消偏振特性时,Mueller 矩阵对角线以外的元素可以忽略。而当目标中没有双折射材料时, $m_{11} \approx m_{22}$,表明入射光振动面的取向对目标出射光偏振度没有影响。目标的 Mueller 矩阵是识别目标的重要特征,也可用 Mueller 矩阵来评价光学元件,如偏振片和波片的均匀性、衰减延迟特性、系统的偏振像差特性等。

1.2 主动偏振成像系统的结构组成

典型的激光雷达遥感系统由激光器、发射系统、接收系统和成像系统组成。而激光雷达偏振成像系统则加入偏振态发生器(PSG)与偏振态分析仪(PSA)。系统原理框图如图 1 所示。

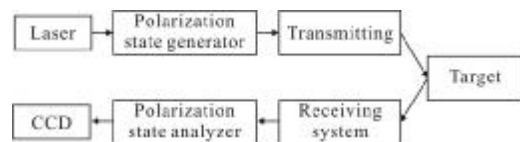


图 1 激光偏振成像系统原理框图

Fig.1 Block diagram of laser polarization imaging system

1.2.1 偏振产生装置(PSG)

偏振态发生器是产生已知、任意可控状态的完全偏振光的装置。目前有两种最常见的 PSG:第一种由光源、起偏器和波片构成,起偏器和 $1/4$ 波片绕光

轴旋转,通过调整偏振片角度和波片快轴的夹角产生任意偏振光。第二种是由光源、起偏器和调制器构成,通过调整施加在液晶相位延迟器上的电压产生所需的偏振光。即通常采用偏振光调制方法来对入射光进行起偏。

1.2.2 偏振分析装置(PSA)

光偏振态的测量可通过测量 Stokes 参数来实现,测量精度取决于测量的空间和时间分辨率。根据探测系统的响应速度,偏振分析方法主要分为两类:一类是偏振光调制方法,在待测光路中引入起偏器和相位延迟器;另一类则是分振幅、分孔径或分焦平面等同时成像方法。前者主要用于稳恒或缓变的连续光束测量,后者主要用于脉冲或瞬变光束偏振态的测量。

1.2.3 系统定标方法

定标就是用已知参数的偏振光测量得到系统的仪器矩阵。每个工作波长只需定标一次,定标后将得到的仪器矩阵存储起来,以供随后的光偏振态测量时使用。常见的定标方法有四点定标法和 Equator-Poles 定标法两种^[16]。

2 偏振光调制方法

偏振光调制方法广泛用于主动偏振成像系统中的起偏和检偏装置。目前有两种常用的调制类型——机械转动调制和相位延迟调制。

2.1 机械转动调制法

图 2 为五种常见的机械转动调制方法的元件布局,P、Q 分别表示偏振片和波片,R 代表旋转,F 代表固定。电机以恒定角速度带动偏振片或波片绕光轴旋转对光波进行调制。

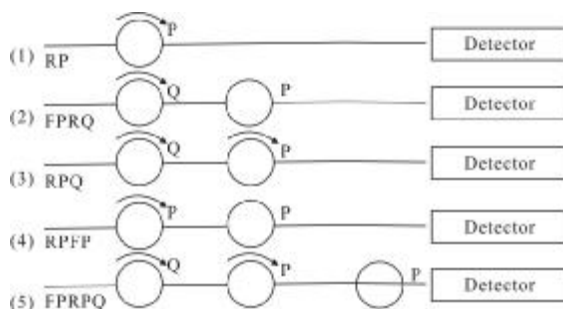


图 2 机械转动调制法的元件布局

Fig.2 Component layout of mechanical rotation method

图 2 中,(1)、(2)为常用的起偏、检偏结构。(1)为旋转偏振片法,它简单且成本低,是许多商用旋转检偏器的核心部件,但其只能获得三个偏振量。(2)为固定偏振片、旋转波片法,可以测量四个偏振量,最常见的使用是双旋转波片法测量目标的 Mueller 矩阵。而结构(3)、(4)、(5)在起偏装置中不常用,偶尔用于检偏装置,通过对探测器输出的电信号作傅里叶分析,得到待测光波的偏振信息。此类机械转动调制方法分时采集图像,测量时间为 10~100 ms,分时采集不适宜探测动态目标,而且旋转等机械运动会带来机械误差,降低测量精度。

2.2 相位延迟调制法

偏振性能在研究范围内保持不变的偏光器件(偏振片和相位延迟器)称为被动式器件,随外部条件改变的器件称为主动式器件,如电光调制器、泡克尔斯效应^[17]、磁光调制器^[18]和光弹调制器^[19-20]等。采用被动式器件的成像系统利用机械转动调制,速度较慢,主动式器件大大提高探测速度,但测量是一系列前后相继的过程,相位延迟调制法的测量时间约为 1 ms。

电光调制技术最早由 Hunt 和 Huffman 提出。Thompson^[21]采用四个电光调制延迟器构建系统;Krishnan^[22]和 Delplancke^[23]将电光偏振调制和分振幅偏振探测结合起来,测量速度达到 2 kHz,可研究变化的目标,适合一些工业控制等实时应用,如钢铁生产中表面质量监测、聚合反应中粒子大小和形状的无损质量控制等。

用电光调制改变延迟所需的控制电压通常较高,而液晶所需的电场相对较小。Bueno^[24]分析了液晶系统的理论和校准,通过简单的矩阵求逆求得 Mueller 矩阵。张志忠^[25]用三个液晶片实现对已知 Stokes 矢量的光的任意偏振状态转换。液晶特别适合于偏振成像,其具有宽接收角、大通光孔径、低像差畸变、低驱动电压、无运动部件等优点。值得注意的是,两个液晶可变延迟器(LCVR)才能产生四个独立的偏振状态,同时液晶的延迟依赖于温度等外界因素,应在每次使用前做标定,且每次测量时间不应过长。

3 典型的主动偏振成像系统结构

3.1 双旋转波片(DRR)系统

在主动偏振成像技术中,常常要测量目标的

Mueller 矩阵来探测识别目标。调制入射光、散射光的偏振态是测量 Mueller 矩阵最基本的方法。Azzam^[26-27]最早采用了 DRR 法,它的起偏和检偏系统均由一对偏振片和 1/4 波片组成。目前比较常用的 DRR 系统结构如图 3 所示。

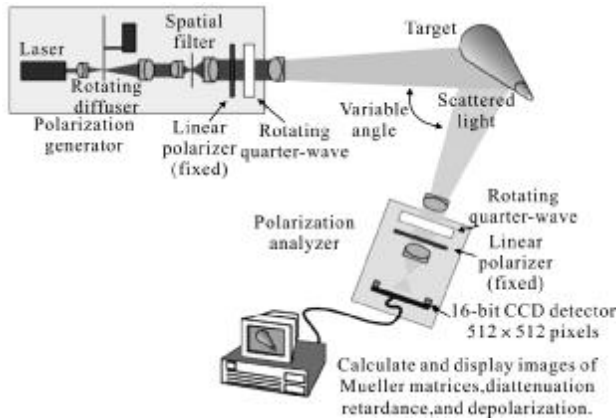


图 3 双旋转波片法系统示意图

Fig.3 Schematic of dual-rotating retarder imaging system

Gerligand^[28]通过 DRR 法对圆锥体成像,根据退偏等特性判定物体形状;Collins^[29]、Wolfe^[30]用此结构高速测量 Mueller 矩阵;Smith^[31]论述了 DRR 法的最优结构;Romerein^[32]对旋转 1/4 波片技术的校准方法进行了研究;Wadsworth^[33]比较了三种不同工艺制造的 1/4 波片性能。

DRR 法装置结构简单,利用固定偏振片避免了探测器的偏振敏感性误差。但测量数据较大,且分时采集在户外测量中会受到风等外界因素的干扰,适合室内静态目标探测。

3.2 基于液晶调谐的偏振结构

当前最常用的相位延迟调制结构是一个偏振片和一对 LCVR 的组合,如图 4 所示,图中,Fs 为白光光纤光源;SI 为聚光灯;d 为扩散器;FD 为视场光阑;AD 为孔径光阑;P1、P2 为偏振片;LC1...4 为液晶;F 为滤光片;C 为相机。Tyo^[34]将其用于 PSG 中进行偏振光谱成像。Laude - Boulesteix^[12]将其同时用于起偏、检偏系统,可获得目标 Mueller 矩阵的所有元素,适用于变化的目标,如病理学研究。Martino^[35]分析了此结构的最优化和偏振校准方法。Liu Xue^[36]将其用于高速激光雷达系统。Wozniak^[37]详细分析了此类结构的调整过程,如装置调整、CCD 参数选

择、液晶角度设置和电压选择等。北京航空航天大学张颖^[38]将 LCVR 应用于全偏振成像技术。

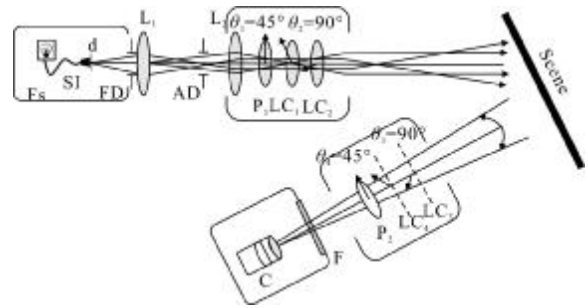


图 4 基于液晶调谐的主动偏振成像系统

Fig.4 Mueller polarimeter with liquid crystal

3.3 振幅分割结构

为了实现高速测量,检偏装置中就不能出现转动部件和调制器。由于液晶调制系统会产生振动、产热等问题,在系统中减少主动式器件也是一种趋势。目前常见的几种无运动部件和调制器的偏振测量方法有分振幅法、分孔径法、分焦平面法和载波条纹法。理论上它们是测量光偏振最快的方法,做到对全部 Stokes 参量的同步测量,测量时间仅由光电探测器的响应速度和相应电路的处理速度决定。

Garlick^[39]最早提出分振幅法,形成双通道系统。随后 Amamm 等人^[40-42]对测量全 Stokes 矢量的分振幅法进行研究。2005 年美军研制了分振幅波前型偏振成像仪,是军用领域偏振探测的代表。中国科学院安徽光学精密机械研究所提出了多探测器分振幅结构^[43]和同时偏振成像探测系统^[44],均可同时获取多幅偏振图像。北京航空航天大学^[45]对 S.Breugnot 提出的两次测量得到偏振度和强度图像方法进行改进,用偏振分束器替代检偏片进行差分成像,如图 5 所示,实现了单次测量获得目标偏振度。

分振幅结构具有实时性的优点,减少了机械转

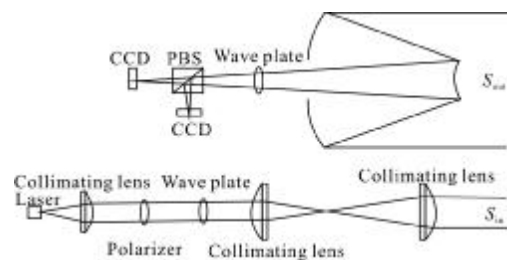


图 5 偏振差分成像装置

Fig.5 Polarization-difference imaging system

动带来的误差,对入射角敏感度较低,但系统成本高,且振幅分割方式对入射光要求较高,光路较难调制,各 CCD 需标定配准,同时系统中较长的光学路径会将微小的偏差放大。

3.4 孔径分割结构

孔径分割技术是将单一光学系统的入瞳面离轴化,分割成多幅相同的子图像。Pezzaniti^[46]和 Moultrie^[47]在偏振成像系统中采用了分孔径结构,如图 6 所示,在入瞳面处安装四个微型透镜,将目标成像在探测器上四个分离的区域,同时获得场景的四幅不同角度的线偏振子图像。

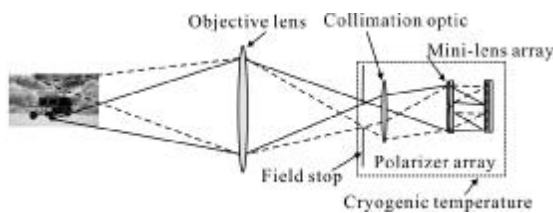


图 6 基于孔径分割偏振成像系统光路图

Fig.6 Division of aperture polarimeter

分孔径结构无运动部件,实时成像。但它损失了空间分辨力,且二次成像会增加系统体积和质量。需要注意的是,由于相干光的相干散射、干涉影响,激光照明下采用这种结构更加复杂。

3.5 分焦平面结构

近年来,美国研制了焦平面红外偏振传感器,它是在凝视焦平面的每个像素上制作微型偏振器,大大提高了偏振成像系统的探测灵敏度,目前正在向大面阵方向发展。图 7 为用在探测器中的偏振片阵列,三到四个微偏振片^[48-49]组成一个偏振片单元,对应四个探测器像元,再用适当的电子学处理就可形成偏振探测器。Alan D. Raisanen^[50]对三种不同制造技术的单像素偏振片性能进行了对比分析。

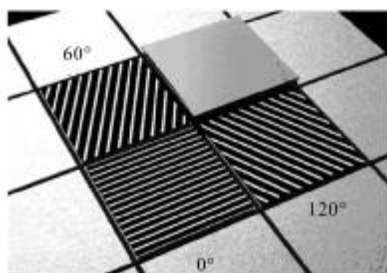


图 7 偏振片阵列示意图

Fig.7 Diagram of array polarizer

分焦平面法是一种新型成像结构,是偏振成像技术发展的高级阶段。但它损失了空间分辨力,每个点需用 2×2 卷积来估计 Stokes 矢量,且它的相邻像素瞬时视场不重叠,会有像素间误差,可考虑通过点扩散函数散焦来减轻瞬时视场误差。制作难度高,目前国内由于加工工艺等方面的局限还没有成型的此类系统。

3.6 空间载波条纹法

空间载波条纹法也是一种无机械运动和主动式器件的偏振成像方法,它通过对 CCD 上产生的干涉条纹傅里叶分析得到偏振信息。北海道大学 Oka^[51]用四个薄双折射楔形棱镜和一个片状分析仪组成检偏系统,如图 8 所示,检偏结构简单、紧凑,但因为双折射棱镜存在分光问题,不适用于高空间分辨率的测量。随后, Oka 采用一对萨伐尔板^[52]来替代搭建系统,可由捕获的单幅图像得到二维 Stokes 参数。Wozniak^[53]采用两对渥拉斯顿补偿器进行空间调制,可用于起偏或检偏,同时使用即可测量光偏振状态和双折射媒介参数。Mujat^[54]提出了一种基于 Sagnac 干涉仪的偏振成像技术,利用干涉方法主动成像,采集一幅图像即获得偏振度和延迟,实时监测偏振特征。Drobczynski^[55]利用载波频率的方法测量角度和延迟。

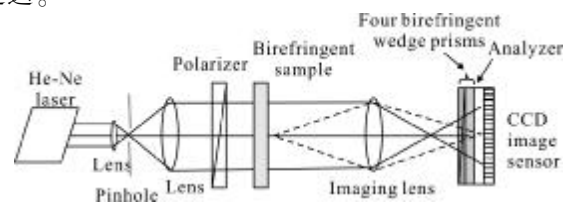


图 8 使用双折射楔形棱镜的偏振成像系统

Fig.8 Imaging polarimeter using birefringent wedge prisms

4 结 论

文中给出了几种常用的主动偏振成像结构的技术方案,并给出了每种技术方案的优缺点。如表 1 所示。

主动偏振成像系统结构的发展主要围绕着照明光源、起偏结构、检偏结构、探测器和扫描方式等几部分,它们直接决定了成像系统最终的性能、价格和实现的技术难度。当前,起偏和检偏装置正从时序探测向同步探测过渡;偏振片的安放位置已完成从物

表 1 几种典型主动偏振成像结构的优缺点

Fig.1 Advantages and disadvantages of several typical active polarimeter

	Advantages	Disadvantages
Rotation element(Single polarizer)	Easiest to implement Inexpensive	Not suitable for dynamic targets Only three polarization parameters achieved
DRR system	Mueller matrix achieved	Not suitable for dynamic targets Large measurement data
Liquid crystals	No moving parts Low drive voltage Low aberration	Heat generation Vibration Dependent on external factors(i.e. temperature)
Division of amplitude	Simultaneous acquisition No mechanical or active element	High mechanical flexibility and rigidity required Expensive Large system size
Division of aperture	Simultaneous acquisition	Loss of spatial resolution
Division of focal plane	Small and rugged Simultaneous acquisition	Fabrication difficult Loss of spatial resolution
Carrier fringe method	Stable and compact	Temporal resolution sacrificing pixel numbers

镜外向光学系统中的转移,未来的发展方向是将偏振片集成到探测器中。

对于主动偏振成像的系统结构,理论方面:结构最优化、参数选择、角度控制等定量工作和不同成像方式的适用范围等仍需进一步研究;硬件方面:提高仪器测量精度和测量速度、自动化、小型化都将是未来偏振成像结构的发展趋势。

参考文献:

- [1] Tyo J Scott, Goldstein Dennis L, Chenault David B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [2] Wang Qi, Liang Xiaoxue, Wei Jingsong, et al. Experiment of laser polarization imaging using streak tube laser imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 427-430. (in Chinese)
王骐, 梁小雪, 魏靖松, 等. 采用条纹管激光成像系统的偏振成像实验[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 427-430.
- [3] Li Yanan, Sun Xiaobing, Mao Yongna, et al. Spectral polarization characteristic of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 205-210. (in Chinese)
李雅男, 孙晓兵, 毛永娜, 等. 空间目标光谱偏振特性[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 205-210.
- [4] Pezzanti J L, Chipman R A. Mueller matrix imaging polarimetry[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6): 1558-1568.
- [5] Chipman R A. Polarization diversity active imaging [C]// SPIE, 1997: 68-73.
- [6] Clémenceau P, Breugnot S, Collot L. Polarization diversity active imaging[C]//SPIE, 1998, 3380: 284-291.
- [7] Goldstein D H. Polarimetric characterization of federal standard paints[C]//SPIE, 2000: 112-123.
- [8] Priest R G, Meier S R. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces [J]. *Opt Eng*, 2002, 41(5): 988-993.
- [9] Réfrégier P, Goudail F. Invariant polarimetric contrast parameters of coherent light [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(6): 1223-1233.
- [10] Réfrégier P, Goudail F, Roux N. Estimation of the degree of polarization in active coherent imagery by using the natural representation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, 21(12): 2292-2300.
- [11] Bueno J M, Artal P. Double-pass imaging polarimetry in the human eye[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(1): 64-66.
- [12] Laude-Boulesteix B, De M A, Drevillon B, et al. Mueller polarimetric imaging system with liquid crystals [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(14): 2824-2832.
- [13] Morel O, Stolz C, Meriaudeau F, et al. Active lighting applied to three-dimensional reconstruction of specular metallic surfaces by polarization imaging [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17): 4062-4068.
- [14] Antonelli Maria-Rosaria, Pierangelo A, Novikova T, et al. Mueller matrix imaging of human colon tissue for cancer diagnostics: how Monte Carlo modeling can help in the interpretation of experimental data [J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10200-10208.

- [15] Breugnot S, Clemenceau P. Modeling and performances of a polarization active imager at $\lambda=806$ nm [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(10): 2681-2688.
- [16] Du Xiliang. Study on the technique for measuring the polarization state of light based no division of amplitude method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
杜西亮. 基于振幅分割的光偏振测量技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [17] Fendrich T, Fischer S K, Bille J F. Development of an electro-optical ellipsometer with application in ophthalmology[C]//SPIE, 1994: 76-82.
- [18] Zhang Jianhua, Liu Liguang, Zhu Henian, et al. The high resolution polarization nulling measurement system with magneto-optical modulator[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, 12(10): 1041-1042.
张建华, 刘立国, 朱鹤年, 等. 应用磁光调制器的高分辨率偏振消光测量系统[J]. *光电子·激光*, 2001, 12(10): 1041-1042.
- [19] Jellison G E, Modine F A. Two-modulator generalized ellipsometry: theory [J]. *Applied Optics*, 1997, 36 (31): 8190-8198.
- [20] Jellison G E, Modine F A. Two-modulator generalized ellipsometry: experiment and calibration [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(31): 8184-8189.
- [21] Thompson R C, Bottiger J R, Fry E S. Measurement of polarized light interactions via the Mueller matrix [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(8): 1323-1332.
- [22] Krishnan S, Nordine P C. Fast ellipsometry and Mueller matrix ellipsometry using the division-of-amplitude photopolarimeter[C]//SPIE, 1996: 152-156.
- [23] Delplancke F. Automated high-speed Mueller matrix scatterometer[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(22): 5388-5395.
- [24] Bueno J M. Polarimetry using liquid-crystal variable retarders theory and calibration[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2000, 2(3): 216-222.
- [25] Zhuang Zhizhong, Suh SeongWoo, Patel J S. Polarization controller using nematic liquid crystals [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(10): 694-696.
- [26] Azzam Rasheed M. A., Mueller-matrix ellipsometry: a review[C]//SPIE, 1997: 396-405.
- [27] Azzam R M A. Photopolarimetric measurement of the Mueller matrix by Fourier analysis of a single detected signal[J]. *Optics Letters*, 1978, 2(6): 148-150.
- [28] Gerligand Pierre-Yves, Smith M, Chipman R. Polarimetric images of a cone[J]. *Optics Express*, 1999, 4(10): 420-430.
- [29] Collins R W, Koh Joohyun. Dual rotating-compensator multichannel ellipsometer: instrument design for real-time Mueller matrix spectroscopy of surfaces and films [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16 (8): 1997-2006.
- [30] Wolfe Justin, Chipman Russell A. High-speed imaging polarimeter[C]//SPIE, 2003: 24-32.
- [31] Smith M H. Optimization of a dual-rotating-retarder mueller matrix polarimeter[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(13): 2488-2493.
- [32] Romerein Matthew J, Philippson Jeffrey N, Brooks Robert L, et al. Calibration method using a single retarder to simultaneously measure polarization and fully characterize a polarimeter over a broad range of wavelengths [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(28): 5382-5389.
- [33] Wadsworth Samuel L, Boreman Glenn D. Comparison of quarter-wave retarders over finite spectral and angular bandwidths for infrared polarimetric-imaging applications[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(36): 6682-6688.
- [34] Tyo J Scott, Turner Jr Theodore S. Imaging spectropolarimeters for use in visible and infrared remote sensing[C]//SPIE, 1999: 214-224.
- [35] De Martino Antonello, Kim Yong-Ki, Garcia-Caurel Enric, et al. Optimized Mueller polarimeter with liquid crystals[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(8): 616-618.
- [36] Liu X, Tseng S, Tripathi R, et al. Automated Stokesmetric imaging laser radar system[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51 (7): 73201-73204.
- [37] Wozniak W A, Kurzynowski P, Drobczyński S. Adjustment method of an imaging Stokes polarimeter based on liquid crystal variable retarders [J]. *Applied Optics*, 2011, 50 (2): 203-212.
- [38] 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 调谐的全偏振多波段成像系统[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(5): 1375-1378.
- [39] Garlick G F J, Steigmann G A, Lamb W E. Differential optical polarization detectors: US, 3992571[P]. 1976-11-16.
- [40] Azzam R M A. Division-of-amplitude photopolarimeter (DOAP) for the simultaneous measurement of all four stokes parameters of light[J]. *Optica Acta: International Journal of*

- Optics, 1982, 29(5): 685-689.
- [41] Azzam R M A. Arrangement of four photodetectors for measuring the state of polarization of light [J]. Optics Letters, 1985, 10(7): 309-311.
- [42] Barter James D, Lee Peter H, Thompson Jr H R, et al. Stokes parameter imaging of scattering surfaces [C]//SPIE, 1997: 314-320.
- [43] Luo Ruizhi, Qiao Yanli, Hong Jin. Polarization imaging device: China, 02264579.9 [P]. 2010-09-22. (in Chinese)
罗睿智, 乔延利, 洪津, 等. 偏振成像装置: 中国, 02264579.9 [P]. 2010-09-22.
- [44] Li Shuang, Qiu Zhenwei, Yang Changjiu. Structure of simultaneous polarization imaging system: China, 201589659 [P]. 2010-01-13. (in Chinese)
李双, 裘桢炜, 杨长久. 同时偏振成像探测系统的光学结构: 中国, 201589659 [P]. 2010-01-13.
- [45] Zhang Xugue, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei, et al. Modeling and theoretical analysis for improving laser polarized active imaging [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(4): 580-584.
张绪国, 江月松, 路小梅, 等. 一种改进激光偏振主动成像的建模及理论分析 [J]. 应用光学, 2008, 29(4): 580-584.
- [46] Pezzaniti J Larry, Chenault David B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter [C]//SPIE, 2005: 58812V - 58880V.
- [47] Moultrie Sean, Roche Michael, Lompado Art, et al, Design of a dual use imager incorporating polarimetric capabilities [C]//SPIE, 2007: 66810B-66820B.
- [48] Nordin Gregory P, Meier Jeffrey T, Deguzman Panfilo C, et al. Diffractive optical element for Stokes vector measurement with a focal plane array [C]//SPIE, 1999: 169-177.
- [49] Sato T, Araki T, Sasaki Y, et al. Compact ellipsometer employing a static polarimeter module with arrayed polarizer and wave-plate elements [J]. Applied Optics, 2007, 46(22): 4963-4967.
- [50] Raisanen A D, Presnar M D, Ninkov Z, et al. Simulation of practical single-pixel wire-grid polarizers for superpixel stokes vector imaging arrays [J]. Optical Engineering, 2012, 51(1): 016201.
- [51] Oka K, Kaneko T. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms [J]. Optics Express, 2003, 11(13): 1510-1519.
- [52] Oka K, Saito N. Snapshot complete imaging polarimeter using Savart plates [C]//SPIE, 2006: 629507-629508.
- [53] Wozniak Wzadzyszaw A., Kurzynowski Piotr. Compact spatial polariscope for light polarization state analysis [J]. Optics Express, 2008, 16(14): 10471-10479.
- [54] Mujat Mircea, Baleine Erwan, Dogariu Aristide. Interferometric imaging polarimeter [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2004, 21(11): 2244-2249.
- [55] Drobczynski S, Bueno J M, Artal Pablo, et al. Transmission imaging polarimetry for a linear birefringent medium using a carrier fringe method [J]. Applied Optics, 2006, 45(22): 5489-5496.