

穆勒矩阵图像的获取及处理

杨 蔚, 顾国华, 陈 钱, 周晓俊, 徐富元

(南京理工大学 电光学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 随着成像技术的发展, 偏振信息在成像技术中的应用逐渐受到广泛的重视。偏振信息的提取方式就显得尤为重要。穆勒矩阵作为表示光照射到物体前后偏振态变化的系数矩阵, 其不仅与物质本身息息相关, 而且含有大量的偏振信息。此外由于穆勒矩阵含有 16 个元素, 且每一个元素含有的信息都不尽相同, 充分利用这些信息能够在目标识别、目标信息增强方面以及目标与背景分离的应用中起较好的促进作用。通过提出一种穆勒矩阵图像的获取方式, 并对穆勒矩阵的信息加以初步的处理, 最后与偏振度的信息加以对比, 充分体现出穆勒矩阵图像在偏振成像应用中所具有的价值。结论表明通过穆勒矩阵图像处理得到的图像比偏振度图像信息更加完整, 能够对后期的模式识别处理提供良好的基础。

关键词: 偏振成像; 穆勒矩阵图像; 穆勒矩阵; 偏振度

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3831-06

Obtaining and processing of Mueller matrix image

Yang Wei, Gu Guohua, Chen Qian, Zhou Xiaojun, Xu Fuyuan

(College of Electric & Optic, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: As the development of imaging technology, application of polarization information in this field has a wide-ranging appreciation gradually. Therefore, the way of extracting polarization information is particularly important. Mueller matrix, the coefficient matrix which shows the change of polarization state before and after light shining on object, not only has a closely relation to the material itself, but also contains quantities of polarization information. What's more, Mueller matrix has 16 elements each containing different information. Consequently, an adequate used on these information plays a catalytic role in target identification, information enhancement, as well as separation of target and background. Through presenting a method to acquire Mueller matrix image, a comparison was made with Dop (degree of polarization) information and at last the result indicated the value of Mueller matrix image in application of polarization imaging. The conclusion suggest that, compared with Dop image, the image processed by Mueller matrix has more integrity information, so as to provide a preferable foundation for pattern recognition later.

Key words: polarization imaging; image of Mueller Matrix; Mueller Matrix; degree of polarization

收稿日期: 2015-04-05; 修订日期: 2015-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(61271332)

作者简介: 杨蔚(1985-), 男, 博士生, 主要从事偏振成像及其相关技术方面的研究。Email: bywyw@hotmail.com

导师简介: 顾国华(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电信息探测与图像处理、光电成像理论与技术、图像识别处理及应用技术方面的研究。Email: gghnjst@163.com

0 引言

随着成像技术的发展,偏振信息在成像技术中的应用逐渐受到广泛的重视^[1-2]。利用偏振成像探测的方法测量目标反射的偏振度和偏振角信息,可以有效弥补传统成像的不足,解决传统光度学在目标识别中难以解决的问题,并取得高精度的结果。该方法在民用和军工领域中均拥有广阔的应用前景^[3]。

目前对于偏振信息的提取大多采用以偏振度、偏振角的图像信息为主体,辅以小波融合等各种算法的方法来提取出偏振度、偏振角图像中的偏振信息,并与原始图像信息融合来达到识别目标或者增强目标信息的目的^[4-8]。偏振度和偏振角信息的获取主要是通过对斯托克斯矢量的计算得到,其本身在含有大量偏振信息的同时,也极有可能混入了一些其他信息。而光在照射到物体表面前后,偏振态会发生一定规律的变化。通常一束光的偏振态是由斯托克斯矢量来表示的,光在照射到物体表面后反射光偏振态的斯托克斯矢量等于穆勒系数矩阵与光在照射到物体表面前的斯托克斯矢量的乘积。此时,穆勒矩阵可看作是一个共有多个元素的中间系数矩阵,其中每个元素都包含大量的物体偏振信息,如果能够充分利用这些物质信息,一定能够在目标识别、目标信息增强方面以及目标与背景分离应用中起较好的促进作用。然而,通常情况下,穆勒矩阵是以矩阵的形式存在,在表现形式上不够直观,不能得到充分的利用。因此,文中提出一种穆勒矩阵图像的获取方式,并对穆勒矩阵的信息进行初步处理,最后与偏振度的信息加以对比,从而能够充分体现出穆勒矩阵图像在偏振成像应用中所具有的价值。

1 斯托克斯矢量

斯托克斯矢量 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$,是 1852 年英国物理学家斯托克斯提出描述光波偏振态的简单数学表达形式。相对于别的表示形式,斯托克斯矢量不仅可以描述完全偏振光、部分偏振光和自然光,还可以描述单色光和非单色光。在这种方法表示下,光学器件及其构成的系统、介质材料等可以看成是对入射光造成影响的一种光学变换,而用穆勒矩阵来表示目标介质对偏振光的作用,斯托克斯参量和穆勒矩阵

的测量就可以很容易解释光在光路中传播时发生的偏振态的变化^[9]。

使用斯托克斯参量 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$ 来表示单色平面光波的各种偏振态,光的电矢量 S 分量(即 y 方向上)振幅 E_S 和 P 分量(即 x 方向上)振幅 E_P 以及相位差 δ 与 4 个斯托克斯参量的关系如下^[9]:

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_P^2 + E_S^2 \\ E_P^2 - E_S^2 \\ 2E_P E_S \cos \delta \\ 2E_P E_S \sin \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_x + I_y \\ I_x - I_y \\ I_{+45^\circ} + I_{-45^\circ} \\ I_R - I_L \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: S_0 为光波的总强度; S_1 为光波在 x 方向上线偏振光分量与 y 方向上线偏振光分量之间的光强差; S_2 为光波在 $\pi/4$ 方向上线偏振光分量与 $-\pi/4$ 方向上线偏振光分量的光强差; S_3 为光波右旋偏振光分量与左旋偏振光分量的光强差。

2 穆勒矩阵图像的获取与处理

2.1 穆勒矩阵

偏振光照射在目标介质表面后,反射光的偏振态会发生变化。用斯托克斯矢量表示如下式^[9]:

$$S' = MS \quad (2)$$

式中: S 为入射光的斯托克斯矢量; S' 为反射光的斯托克斯矢量; M 即为穆勒矩阵。根据公式(2)可以看出,穆勒矩阵 M 为中间变量,通过测量入射光和反射光的斯托克斯矢量就可以很容易求出穆勒矩阵。但是,根据前文的介绍可知, S 和 S' 都是一组 1×4 的向量。因此,穆勒矩阵 M 是一组 4×4 的系数矩阵,即:

$$\begin{pmatrix} S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ S_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.2 穆勒矩阵图像

通常穆勒矩阵中的元素均为具体的数值,为了便于计算和更加直观地表示,文中采用图像的形式来表示穆勒矩阵,即穆勒矩阵图像。实验的采集设备是 Basler 公司的高速高帧频 CCD,像素分辨率为 640×480 ,也就是说每一幅图像都含有 640×480 个像素点,通过 CCD 可以分别直接采集到透过 0° , 45° , 90° 和 135° 的偏振片的偏振图像。以这 4 幅图像的每一个像素点为基础,可以计算得到每个像素点各自

的反射光斯托克斯矢量 $S'=(S_1, S_2, S_3, S_4)^T$ 。然后通过旋转入射光部分的偏振片 P2,使其偏振方向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° , 这样对应的入射光初始斯托克斯矢量分别为:

$$\begin{aligned} S_{0^\circ} &= I_0(1, 1, 0, 0)^T \\ S_{45^\circ} &= I_0(1, 0, 1, 0)^T \\ S_{90^\circ} &= I_0(1, -1, 0, 0)^T \\ S_{135^\circ} &= I_0(1, 0, -1, 0)^T \end{aligned} \quad (4)$$

式中: I_0 为激光的光强值。每一束入射光分别采集对应的 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 的偏振图像, 计算得到 4 组斯托克斯矢量 $S_{0^\circ}', S_{45^\circ}', S_{90^\circ}', S_{135^\circ}'$, 再加入一组圆偏振分量的入射光, 即 $S_{\text{圆}}=I_0(1, 0, 0, 1)^T$, 计算得到穆勒矩阵 M 。最后将每个像素点所对应的穆勒矩阵元素一一提取还原到图像中去, 即可得到穆勒矩阵图像组。

2.3 测量方法与流程

选取不同的入射光偏振方向, 4 个为一组, 采集 4 组视频, 每一组视频长度为 10 s, 每秒为 30 帧, 然后对每一组视频中每帧图像取像素均值, 从而降低背景噪声, 继而通过这 16 个方程解出穆勒矩阵。同时, 由于系统中含有光学器件本身的穆勒矩阵, 故在以图像像素值代替出射光能量的同时, 必须确保入射光光强不变, 以避免斯托克斯归一化带来的误差。光路示意图如图 1 所示。

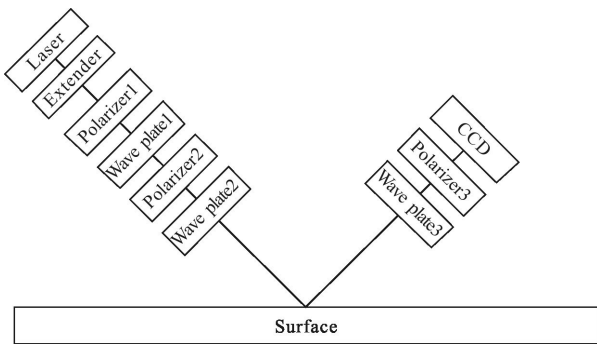


图 1 穆勒矩阵图像采集系统
Fig.1 Image collecting system of Mueller Matrix

实验选用 632.8 nm 波长的激光点光源, 首先先让激光通过扩束系统扩大光斑。扩束系统是由一个 5 倍的激光扩束镜、两片凸透镜和一个光阑组成。由于激光光源本身较小, 一般的扩束镜扩束后的光斑大小仍不能满足实验需求, 因此加入两个凸透镜来继续扩束, 将光斑扩至所需大小。由于光经扩束镜扩束后带有一些杂散光, 因此, 在两个透镜的焦点重合

处加入光阑来去除杂散光。通过扩束系统后, 激光束依次通过偏振片 P1, 波片 W1, 偏振片 P2。因为穆勒矩阵 M 是一组 4×4 的系数矩阵, 共有 16 个元素, 然而通常的一组 S 和 S' 不足以解出穆勒矩阵 M , 故必须有 4 组互不相同的 S 和 S' 来得到穆勒矩阵 M 。因此, 文中采用 4 组不同偏振态的偏振光来照射目标表面, 如此一来就可以得到 4 组不同的 S 和 S' , 从而能够解出穆勒矩阵 M 的 16 个元素。光束在通过偏振片 P1 后成为线偏振光, 接着通过快轴与偏振片 P1 偏振方向成 45° 角的波片 W1 成为圆偏振光, 然后通过偏振片 P1 成为线偏振光, 最后通过波片 2 成为圆偏振光。因为斯托克斯矢量的第一个元素是光强信息, 因此, 不同偏振态的偏振光光强必须一样。故先将光束变为圆偏振光, 这样, 可以保证通过偏振片 2 的线偏振光的斯托克斯矢量的光强元素一定是等值的。线偏振光的斯托克斯矢量的第 4 个元素即圆偏振分量一定为 0, 因此, 仅用线偏振光为入射光就只能测得穆勒矩阵 M 的线偏振元素, 最后一行和一列的圆偏振元素仍难以获得。故加入波片 W2 和波片 W3, 采用一组圆偏振光入射, 建立方程, 与之前偏振光入射所得到的 S 联立可以求得穆勒矩阵 M 。

2.4 穆勒矩阵图像的处理

通过上述流程能够计算得到目标与背景所对应的穆勒矩阵图像, 由于穆勒矩阵图像中所含有的图像元素过多, 信息较分散, 因此, 需要对穆勒矩阵图像组进行一些处理来分析哪些图像元素中含有对应的信息。

(1) 伪彩色处理

伪彩色处理是目前常用的一种将黑白图像处理手法。主要是根据特定的准则对灰度图像赋以 R, G, B 三色使其转变为彩色图像, 这样就可以能够比较明显的区别出原本灰度值相近但属性不同的信息。文中主要是采用“产生”一束斯托克斯矢量为 $(1, 0, 1, 0)^T$ 的线偏振光“照射”到得到的穆勒矩阵, 对产生的斯托克斯矢量的第 2、3、4 个图像分别赋以 R, G, B 三原色, 来得到伪彩色图像。

(2) 退偏振信息提取

偏振的传输特性有: 双向衰减(Diattenuation), 与偏振有关的强度衰减特性; 相位延迟(Retardance), 与偏振相关的位相改变特性; 退偏(Depolarisation), 偏振光转化为非偏振光的特性。其中退偏振特性在偏振的讨论中有着较为重要的意义。退偏振特性的能

力能够很好的表示出目标物体和背景对入射光偏振态的影响。

由于穆勒矩阵可以简单分解为 4 个部分:(1) 穆勒矩阵的 16 个元素中, M_{00} 体现出目标物体对入射光的传输散射、反射光强的能力,即强度特性;(2) M_{01} 、 M_{02} 、 M_{03} 分别体现出目标对入射光的水平、垂直和圆偏双向衰减能力,即双向衰减特性;(3) M_{10} 、 M_{20} 、 M_{30} 体现出目标对入射光非偏振光的起偏能力;(4) 其余的 12 个元素体现出目标对于入射光的退偏振和相位延迟能力,即退偏振和相位延迟特性。因此,对所含元素最多的退偏部分进行提取和处理。

所采用的指标为退偏振指数 $DI(M)$, 定义如下:

$$DI(M) = \frac{\left\{ \sum_{j,k=0}^3 m_{jk}^2 - m_{00}^2 \right\}^{1/2}}{\sqrt{3} m_{00}} \quad (5)$$

(3) 偏振度图像

为了表示偏振光强度的占有量,使用偏振度(P)表示完全偏振光强度在整个光强度中的比例:

$$P = \frac{\sqrt{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)}}{S_0} \quad (6)$$

偏振度图像是目前在偏振图像处理中采用最为广泛的一种图像。文中将采用穆勒矩阵图像处理后的图像和偏振度图像作对比。

3 实验结果与对比

文中将采用两组实验进行对比。由于穆勒矩阵图像信息较多,因此,文中对穆勒矩阵进行一系列的信息提取处理,主要是方式为制造出一束线偏振光对计算所的穆勒矩阵进行照射,将得到的图像进行伪彩色处理合成一幅伪彩色图像并提取穆勒矩阵中的与退偏振指数相关的信息。

文中第一组实验目标为常见的树叶,背景为涂有伪装油漆的铁板。实验结果如图 2(a)、(b)所示。

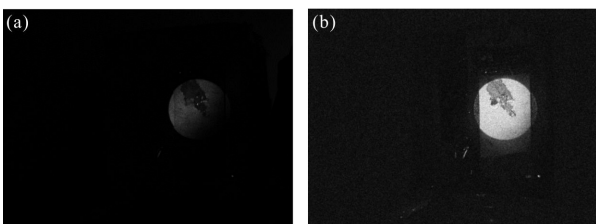


图 2 原始图像(a)和偏振图像(b)

Fig.2 Original image (a) and DOP image (b)

图 3 为 CCD 采集的原始图像,图 4 为利用 CCD 采集到的偏振图像求得目标与背景的偏振度图像,图 5 为利用采集到的偏振图像计算所得到的穆勒矩阵图像组,图 6 为对穆勒矩阵图像加以伪彩色处理后得到的图像,图 7 为对图 5 的穆勒矩阵图像进行处理后所得到的退偏振图像。为了消除光强度值对图像的影响,文中将穆勒矩阵做归一化处理,即将穆勒矩阵所有的元素都除以穆勒矩阵中的第一个元素——强度元素,因此,在这个穆勒矩阵图像组中已经去除强度信息的影响,每个元素的偏振信息都能够较好的体现。从图像的对比中,不难看出,尽管图 4 相比图 3 已经能够简单的分辨出目标树叶与伪装背景,但是相比图 7 而言,图 4 中的物体信息不够完整,树叶根茎的显示不如图 7 清晰,树叶的边缘同样也不如图 7 显示的清晰。而且树叶本身的小孔信息也没有图 7 显示的完整和明确。而通过图 6 的伪彩色图像可以很清晰的看出背景呈现浅色,说明在处理过程中,赋予浅色部分的穆勒矩阵的元素含有大量的背景信息,如此一来,在目标识别中,浅色部分就可以直接当作背景信息使用,这为模式识别中对背景的提取或抑制都提供了很好的基础。

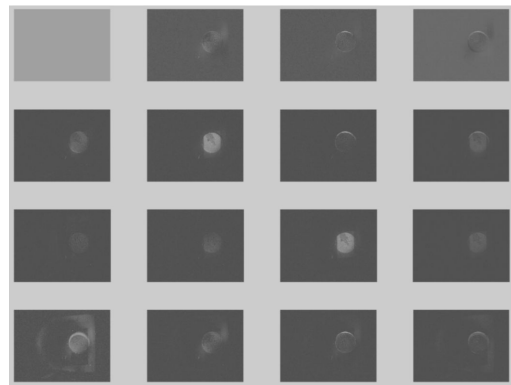


图 3 穆勒矩阵图像

Fig.3 Image of Mueller Matrix

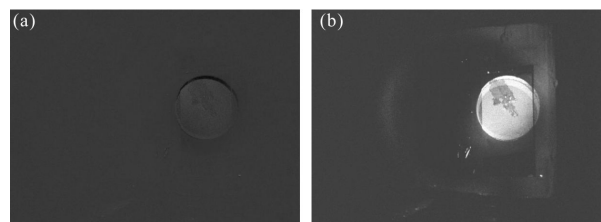


图 4 伪彩色处理后图像(a)和退偏振图像(b)

Fig.4 Image after pseudo color processing (a) and depolarization image (b)

文中第二组实验采用的目标是伪装网材料,背景是涂有伪装油漆的常用转台上的盖子。

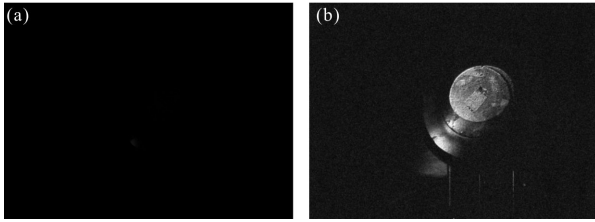


图 5 伪装材料原始图像(a)和偏振度图像(b)

Fig.5 Original image of camouflage material (a) and DOP image (b)

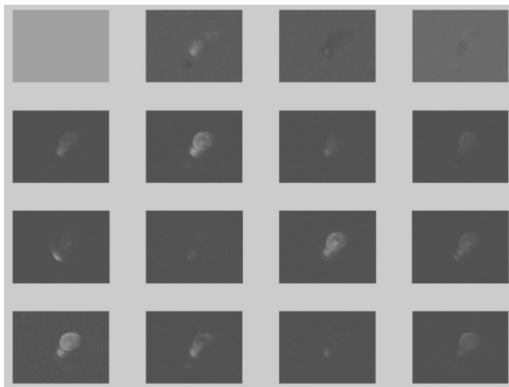


图 6 伪装材料的穆勒矩阵图像

Fig.6 Mueller Matrix image of camouflage material

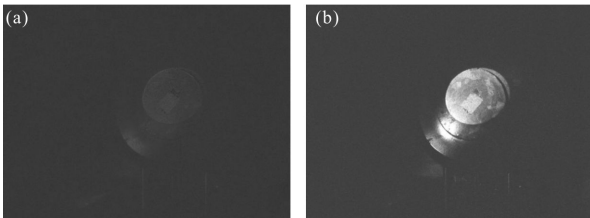


图 7 伪装材料伪彩色处理后图像(a)和退偏振图像(b)

Fig.7 Camouflage material after pseudo color processing of image (a) and depolarization image (b)

图 5(a)为 CCD 采集的原始图像,图 5(b)为利用 CCD 采集到的偏振图像求得目标与背景的偏振度图像,图 6 为利用采集到的偏振图像计算所得到的穆勒矩阵图像组,图 7(a)为对穆勒矩阵图像加以伪彩色处理后得到的图像,图 7(b)为对图 6 的穆勒矩阵图像处理所得到的退偏振图像。图 6 中的穆勒矩阵图像组也做了归一化处理。通过图像对比可以看出,这些图片都能够最基本的增强目标和背景信息。与图 7(b)相比,图 5(b)能够将伪装材料与背景金属的伪装涂层简单区分开,但是伪装网本身的边缘信

息不清晰,特别是伪装网上面部分的胶痕。而通过图 7(a)的伪彩色处理可以看出,由于目标和物体都含有伪装成份的信息,同时目标物体和背景都呈现出浅色,说明赋予浅色伪彩色的部分含有伪装信息,而在这个伪彩色处理中没有很好的提取出两个材料本身的信息。如果能够提取出目标和背景的信息,并分别赋予不同的伪彩色,这样,就可以大大增强目标探测和识别的能力。

4 结 论

文中提出了一种穆勒矩阵图像的获取方式,并对穆勒矩阵的信息加以初步的处理。从实验结果和图像对比中可以看出,穆勒矩阵图像同样含有大量的偏振信息,由于穆勒矩阵具有 16 个元素,且每个元素中都分别含有不同的信息,如此一来,偏振信息更加丰富多样,相比偏振度图像,在目标识别、目标信息增强方面以及目标与背景分离领域均能有更为广泛的应用。文中对穆勒矩阵图像组进行了初步的处理,相信后期在穆勒矩阵图像处理中加入一些图像处理的手法,能够更好的提高识别精度,为模式识别等提供良好的基础。

参考文献:

- [1] Tang Ruoyu, Yu Guoping, Wang Xiaofeng. Acquisition method of polarization image in natural lighting environment [J]. *J Wuhan Univ (Nat Sci Ed)*, 2006, 52(1): 59-63. (in Chinese)
- [2] Li Hailan, Wang Xia, Zhang Chuntao, et al. The development and analysis of target detection research based on polarization imaging technology [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(5): 695-700. (in Chinese)
- [3] Gong Jieqiong, Zhan Haigang, Liu Dazhao. A review on polarization information in the remote sensing detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 1088-1095. (in Chinese)
- [4] Chen Weili, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Approach to fusing MWIR polarization image based on wavelet packet transform [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(5): 579-582, 610. (in Chinese)
- [5] Cui Yan, Gao Qisheng, Chu Jinkui, et al. Influence of sunlight and moonlight on polarization patterns during twilight [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1):

- 34–39. (in Chinese)
- [6] Chen Weili, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Experiment of target detection based on medium infrared polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 7–11. (in Chinese)
- [7] Wang Jun, Ding Na, Li Jianjun, et al. Infrared polarization image: detection and recognition of camouflage target [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33 (3): 441–445. (in Chinese)
- [8] Zhang Dexiang, Zhang Jingjing, Wu Xiaopei, et al. Fusion of polarization image based on directionlets transform [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33 (12): 2795–2800. (in Chinese)
- [9] Scott Tyo J, Dennis L Goldstein, David B Chenault, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(33): 5453–5469.