

基于微偏振片阵列的偏振成像技术研究

赵永强,张宇辰,刘吾腾,张艳,李琳,潘泉

(西北工业大学 自动化学院 信息融合技术教育部重点实验室,陕西 西安 710072)

摘要: 基于微偏振片阵列(MPA)的偏振成像设备在体积、重量、功耗等方面的优势,极大促进了偏振成像的应用领域。但目前对于 MPA 光栅参数设计、单元排布模式以及偏振特征解算等方面的研究均存在严重不足,影响了准确偏振特征的获取。针对这些问题,文中利用光栅衍射和等效介质理论进行 MPA 光栅参数设计,并提出 MPA 在频域内的联合编解码设计方法,以期 MPA 单元排布与偏振特征解算达到综合最优。仿真结果表明,MPA 编解码设计方式的选择将会对偏振信息的获取性能产生较大影响。

关键词: 偏振成像; 微偏振片阵列; 等效介质理论; 联合编解码

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3117-07

Polarization imaging by micro-polarizer array

Zhao Yongqiang, Zhang Yuchen, Liu Wuteng, Zhang Yan, Li Lin, Pan Quan

(Key Laboratory of Information Fusion Technology of Ministry of Education, School of Automation,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Micro-polarizer array (MPA) imaging technology has special advantage in equipment volume, weight, real-time imaging etc. All these advantages expand the application of polarization imaging. But little research has been done on how to design MPA parameters, and how to arrange MPA cells, and how to calculate polarization parameters from acquired images. In order to solve this problem, the study of micro-polarizer array (MPA) imaging was carried out in this paper, the grating diffraction and equivalent medium theory were utilized in the design of the relevant parameters for MPA, and a joint coding and decoding design method in frequency domain for MPA was also put forward. The simulation results reveal that the choice of the design method for joint coding and decoding of MPA will have a significant impact on the acquisition performance of polarization information.

Key words: polarization imaging; micro-polarizer array(MPA); equivalent medium theory; joint coding and decoding

收稿日期:2015-09-09; 修订日期:2015-10-11

基金项目:国家自然科学基金(61371152,61071172,61374162);国家自然科学基金委员会与韩国国家研究基金会合作交流项目(61511140292);
教育部新世纪优秀人才计划(NCET-12-0464);中央高校基础研究基金(3102015ZY045)

作者简介:赵永强(1976-),教授,博士生导师,主要从事图像处理、偏振视觉、高光谱遥感、稀疏表示、多目标优化等方面的研究。

Email:zhaoyq@nwpu.edu.cn

0 引言

通过综合利用光的偏振特征,可以得到所观测目标的介电常数、复折射率、反射率、表面法线方向等信息,这类特征信息是单纯利用光的强度特征无法得到的^[1]。因此,充分利用光的偏振特征,并综合强度特征可极大提高信息获取与分析能力。在工业检测、环境监测^[2]、医学诊断^[3]、海洋监测^[4]、大气遥感^[5]、仿生导航^[6]、天文观测^[7]、显微成像以及军事成像处理等方面,偏振成像具有其他成像探测手段难以比拟的优势。

现有偏振成像仪器多采用分时、分振幅以及分孔径成像方式^[8]。在设备体积、重量、功耗、成像实时性、能量透过率、信噪比等方面存在诸多不足,极大限制了偏振成像技术在军事和民用领域的应用范围。MPA 成像技术在理论上具有高透过率、高消光比、高实时性、高可靠、高分辨率、低功耗等特点,不仅可以克服传统偏振成像技术的不足,还有望拓展偏振成像技术在高动态平台中的应用。但是目前国内对于微偏振片阵列的光学参数设计、微偏振片单元的排布模式及如何从所获取的偏振马赛克图像获取准确偏振特征等方面的研究成果较少,无法支撑基于 MPA 的偏振成像技术的发展和

应用。文中给出了利用光栅衍射和等效介质理论进行 MPA 光栅参数设计方法,提出了 MPA 频域内的联合编解码设计方法,并结合仿真证明所给出编解码方法的有效性。文中内容安排如下:第 1 节介绍 MPA 成像技术及其分类;第 2 节介绍 MPA 光栅参数设计方法;第 3 节 MPA 联合编解码设计及实验结

果;第 4 节为全文总结。

1 MPA 成像技术及其分类

目前常见的偏振片的尺寸都在厘米量级。随着微纳加工技术的进步,偏振片的尺寸可以达到微米量级,MPA^[9]应运而生,如图 1 所示。MPA 的每 2×2 单元分别代表 0°,45°,90°和 135°透偏振方向。MPA 集成在感光芯片上,其单元大小与所要集成的感光芯片的像素单元大小完全一致,并且 MPA 的单元与感光芯片像素单元需逐一对准。

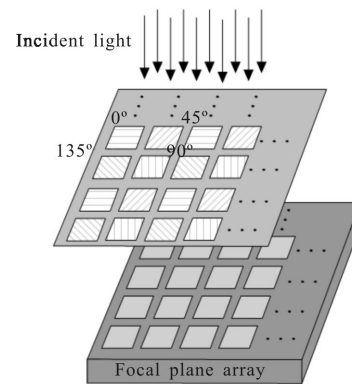


图 1 MPA 示意图

Fig.1 Illustrative figure of MPA

利用这种 MPA 进行偏振成像探测的技术就是 MPA 成像技术。这种偏振成像方式不存在分光元件,在理论上具有高透过率、高消光比、高实时性、高可靠、高时间分辨率、低功耗等特点,是偏振成像技术的发展趋势。根据 MPA 制作工艺的不同,微偏振片成像技术目前可大致分为三类,即基于高分子薄膜制造工艺(PVA)、基于液晶材料和基于金属微纳光栅的微偏振片成像技术。表 1 比较了这三种技术的特点。

表 1 MPA 制造工艺特点

Tab.1 Current characteristics of the fabrication of MPA

Manufacture technology	Main technological process	Advantages	Drawbacks
Polymer film manufacturing technology (PVA material)	(1) Put the PVA between two CAB layers; (2) Remove the top layer of CAB; (3) Fix the thin film made of PVA; (4) Remove the top layer of CAB; (5) Paint photoresist; (6) Lay the lithography mask; (7) Develop; (8) Reactive ion etching; (9) Etching of the second layer	(1) Polarization efficiency can reach 99.5%; (2) Wide range for application can be used in the whole visible band.	(1) Intensity is low; (2) Relatively complicated technique process; (3) Crosstalk among pixels is strong; (4) Application environment should be dry and the polarization is easy to degenerate ^[10] .

续表 1
Continued Tab.1

Manufacture technology	Main technological process	Advantages	Drawbacks
Liquid crystal materials	(1) Clean the glass surface; (2) Paint SD1 solution; (3) Bake the samples; (4) Lay the lithography mask; (5) Paint the mixed solution of dichroic dyes and NLC; (6) Bake the basement; (7) UV-irradiation.	(1) Array thickness is small; (2) Crosstalk among pixels is not easy to happen; (3) Good polarization characteristics between the band of 400 nm to 650 nm	Polarization characteristic drops sharply in the band of red light (650 - 700 nm) and application field is limited ^[11-12]
Metal micro-nano grating	(1) Optimize the glass surface through CMP; (2) Plate the aluminum and silicon dioxide; (3) Paint photoresist; (4) Exposure and develop; (5) Etch aluminum nanowire; (6) Paint negative photoresist and bake; (7) Lay the lithography mask, then bake and develop; (8) Etch micro polaroid array; (9) Grind and polish the layer of silicon dioxide; (10) Repeat (2) to (9) until the array is formed completely.	(1) Small volume, compact structure, easy integration; (2) High diffraction efficiency; (3) Crosstalk among pixels is low, good polarization character ^[13-17] .	(1) Need to etch by layers; (2) Relatively complicated technique process

综合表 1 的分析可知, 金属微纳光栅是实现 MPA 成像比较理想的选择。但是相关产品主要由美国和日本等国制造, 处于垄断地位, 售价较高, 而国内没有相应产品与之抗衡。因此, 国内已有学者关注到这个问题, 并积极尝试突破。

除了制造工艺通过影响微偏振片的性能进而影响成像质量外, 微偏振片的诸多参数, 如基底材料、光栅周期、光栅宽度、光栅槽深等是成像质量的重要因素。此外, MPA 是以空间换时间, 四个像元为一超级像元且每个像元分别对应不同的偏振角度, 所以在阵列研制前需进行 MPA 联合编解码设计, 以实现偏振信息的最优获取。

2 微偏振片参数设计

在设计光栅阵列的基底材料、栅槽深度、光栅周期、光栅深度等相关参数时, 文中将使用光栅衍射理论和等效介质理论^[18]。

TM(电矢量垂直于光栅刻槽)偏振透射率和 TE(电矢量平行于光栅刻槽)偏振透射率的表达式如公式(1)、(2)所示^[18]。

$$T_{TM} = \frac{4nA^2}{1+(1+n)^2A^2} \tag{1}$$

$$T_{TE} = \frac{4nB^2}{1+(1+n)^2B^2} \tag{2}$$

式中: n 为透明基底材料的折射率; A, B 的表达式如下。

$$\frac{1}{A} = \frac{4T}{\lambda} \left\{ \ln \left[\csc \frac{\pi(T-a)}{2T} \right] + \frac{Q \cos^4 \left[\frac{\pi(T-a)}{2T} \right]}{1+Q \sin^4 \left[\frac{\pi(T-a)}{2T} \right]} + \frac{1}{16} \left(\frac{T}{\lambda} \right)^2 \left[1 - 3 \sin^2 \frac{\pi(T-a)}{2T} \right]^2 \cos^4 \frac{\pi(T-a)}{2T} \right\}$$

$$B = \left\{ \ln \left[\csc \frac{\pi a}{2T} \right] + \frac{Q \cos^4 \left[\frac{\pi a}{2T} \right]}{1+Q \sin^4 \left[\frac{\pi a}{2T} \right]} + \frac{1}{16} \left(\frac{T}{\lambda} \right)^2 \left[1 - 3 \sin^2 \frac{\pi a}{2T} \right]^2 \cos^4 \frac{\pi a}{2T} \right\}$$

式中: $Q = \frac{1}{[1-(T/\lambda)^2]^{1/2}} - 1$; T 为光栅周期; a 为光栅宽度; λ 为入射光波长。

(1) 基底材料

根据公式(1)和(2)可分析基底折射率对于光栅透射率和消光比的影响, 具体影响如图 2 和图 3 所示。

从图中曲线可以看出, 用低折射率构成的线栅其透射率和消光比均优于高折射率的。另外, 透射率

随着 λ/T ($\lambda > 4T$ 以后) 变化不大, 消光比则随着 λ/T 增大而更优。所以, 当基底材料在指定波段的透射率相当的情况下, 尽可能的选择折射率低的材料。

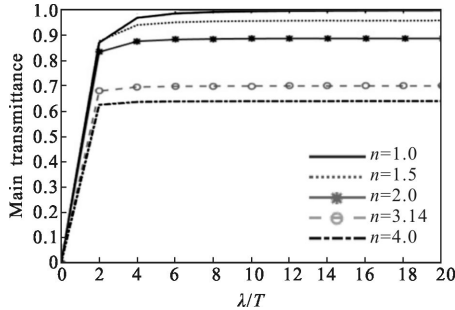


图 2 主透射率与 λ/T 的关系曲线

Fig.2 Curves of the relationship between the main transmission rate and λ/T

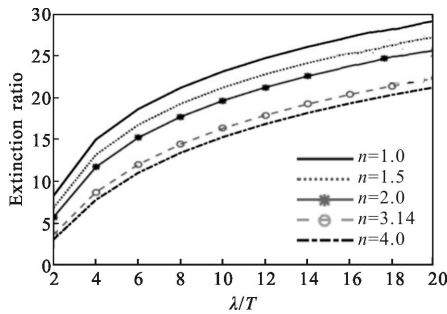


图 3 消光比与 λ/T 的关系曲线

Fig.3 Curves of the relationship between the extinction ratio and λ/T

(2) 栅槽深度

根据薄膜光学的抗反射设计方法, 正入射情况下, 当介质膜的折射 $n = \sqrt{n_1 n_2}$ (n_1 为反射区折射率; n_2 为透射区折射率), 且满足厚度为 $\lambda_0/4$, 即

$$nh = \lambda_0/4 \tag{3}$$

式中: h 为光栅刻槽深度, 等效为介质薄膜层厚度, 此时膜的增透效果最好。在小占空比时, 由于亚波长金属光栅对 TM 偏振波表现为介质膜特性, 因此, 要使 TM 偏振透射率达到最大值, 应使光栅对 TM 偏振波的有效折射率 $n_{TM} = n$, 且光栅的厚度为 $\lambda_0/4$ 。进而可针对所选用的基底算出光栅槽深度 h 。

(3) 光栅周期(T)和光栅宽度(a)

可见, 当 a/T 一定时, 可得到主透射率与消光比随 λ/T 的变化。也可知当 λ/T 一定时, 主透射率与消光比随 λ/T 的变化。用 Matlab 画出上述曲线如图 4~图 7 所示(取 $n=2.4$, 将 ZnSe 作为基底)。

由图 4 和图 5 的曲线可以看出, 当波长与光栅

周期之比 λ/T 大于 4 时, 主透射率(TM)的变化不大; 而消光比随着 λ/T 增大而不断增大。

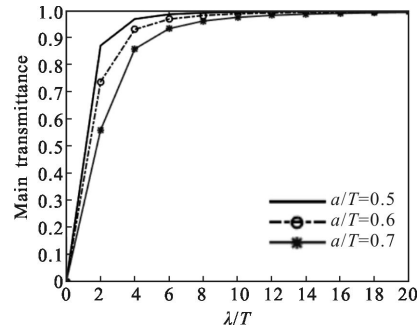


图 4 a/T 一定时, TM 透射率随着 λ/T 变化的曲线

Fig.4 Curves of the relationship between the variation of main transmission rate and λ/T when a/T is fixed

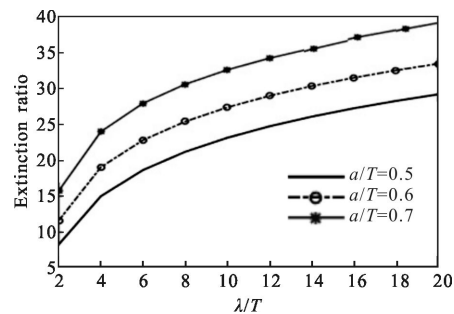


图 5 a/T 一定时, 消光比随着 λ/T 变化的曲线

Fig.5 Curves of the relationship between the variation of extinction ratio and λ/T when a/T is fixed

由图 6 和图 7 可知, 当 λ/T 一定时, 主透射率(TM)随着 a/T 开始变化较为缓慢, 在接近 1 时陡然减小; 消光比是随 a/T 增大而不断增大。

综合以上分析, 为了达到较高的主透射率和消光比, 一般可选用 $\lambda/T=12, f=a/T=0.5$ 。

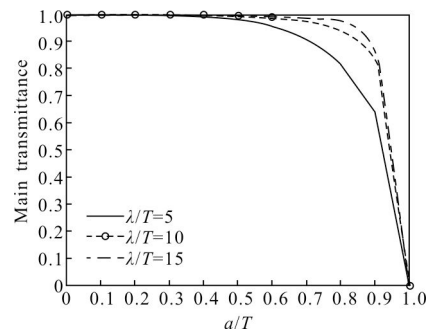


图 6 λ/T 一定时, TM 透射率随着 a/T 变化的曲线

Fig.6 Curves of the relationship between the variation of main transmission rate and a/T when λ/T is fixed

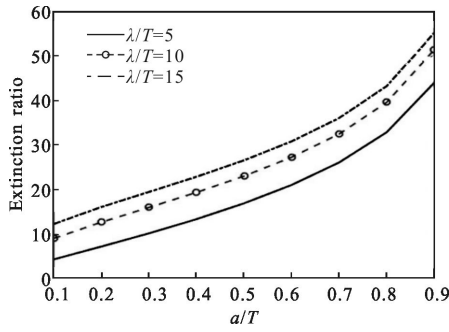


图 7 λ/T 一定时,消光比随着 a/T 变化的曲线
Fig.7 Curves of the relationship between the variation of extinction ratio and a/T when λ/T is fixed

3 MPA 联合编解码设计

MPA 每个光栅单元对应焦平面的不同像素,不同单元具有不同的偏振成像角度,不同单元偏振方向的编码不仅需要采集足够的偏振信息,还应该利用不同偏振角度间的相关性联合编码最优的成像偏振角度。文中所涉项目拟在频域内对阵列进行联合编码设计,通过对阵列模式(阵列的一个周期)进行离散傅里叶变换得到该模式对应的频率结构,由于通过 MPA 得到的偏振图像可以分解为强度成分和偏振度成分,这些都可以在频率结构上表示出来,基于这一理论,为了得到输出效果更好的图像(消除成像锯齿、模糊等现象),提出以下原则^[19-20]:

- (1) 偏振频率成分越少,频域中混叠可能性越小;
- (2) 偏振亮度成分和偏振色度成分的距离越大,频域混叠程度越小,同时偏振色度成分应该尽可能不在偏振亮度成分的水平或者垂直轴上;
- (3) 由于去马赛克结果(各个偏振角度图像)是由去马赛克矩阵 D 与频率成分相乘得到的,矩阵 D 的范数越小,则去马赛克效果越好;
- (4) 偏振片从 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 四个角度中选择。

基于以上原则,提出了一种 MPA 联合编解码设计方法。首先,对通过 MPA 采集的马赛克图像在空间域进行表示,如图 8 所示。

用矩阵表示这一过程,如公式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} I_0 & I_{45} \\ I_{135} & I_{90} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot I_0 + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot I_{45} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot I_{90} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot I_{135} \quad (4)$$

接着,基于符号 DFT 的定义^[21-23],空间域中一个

周期的矩阵可在频域中表示为:

$$\text{DFT} \begin{bmatrix} I_0 & I_{45} \\ I_{135} & I_{90} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} I_0+I_{45}+I_{90}+I_{135} & I_0-I_{45}-I_{90}+I_{135} \\ I_0+I_{45}-I_{90}-I_{135} & I_0-I_{45}+I_{90}-I_{135} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{FS}'_0 & \text{FS}'_1 \\ \text{FS}'_2 & \text{FS}'_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

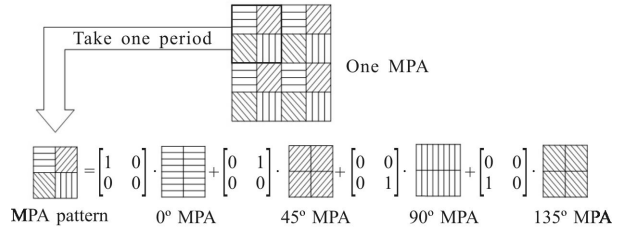


图 8 空间域马赛克图像表示示意图

Fig.8 Representation of mosaic image in spatial domain

在此频域结构的基础上,可以很容易找到偏振强度和偏振色度之间的线性关系,即

$$\begin{bmatrix} \text{FS}'_0 \\ \text{FS}'_1 \\ \text{FS}'_2 \\ \text{FS}'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & -0.25 & -0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & -0.25 & -0.25 \\ 0.25 & -0.25 & 0.25 & -0.25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_{45} \\ I_{90} \\ I_{135} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} I_0 \\ I_{45} \\ I_{90} \\ I_{135} \end{bmatrix} \quad (6)$$

最后,去马赛克矩阵 D 可以通过对 T 求逆(如果可逆)获得,若 T 不为方阵,则可以求其广义逆来解决。

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_{45} \\ I_{90} \\ I_{135} \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} \text{FS}'_0 \\ \text{FS}'_1 \\ \text{FS}'_2 \\ \text{FS}'_3 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} \text{FS}'_0 \\ \text{FS}'_1 \\ \text{FS}'_2 \\ \text{FS}'_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

文中试图寻找减少混叠的频率结构。权衡考虑四点原则和红外偏振成像的需求后,分别选取 5×5 和 2×4 的频率结构进行 MPA 设计,如公式(8)和(9)所示。根据这两种频率结构设计的阵列如图 9 所示。其频率分布如图 10 所示,可以看出所设计的阵列符合提出的原则,达到了设计要求。

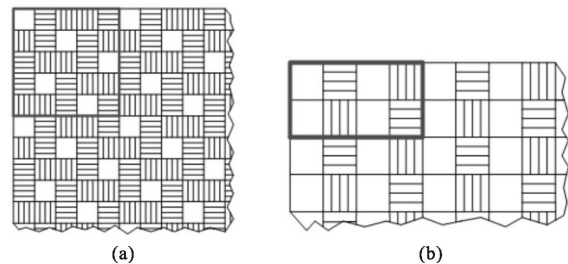


图 9 所提出的阵列模式示意图

Fig.9 Proposed array models

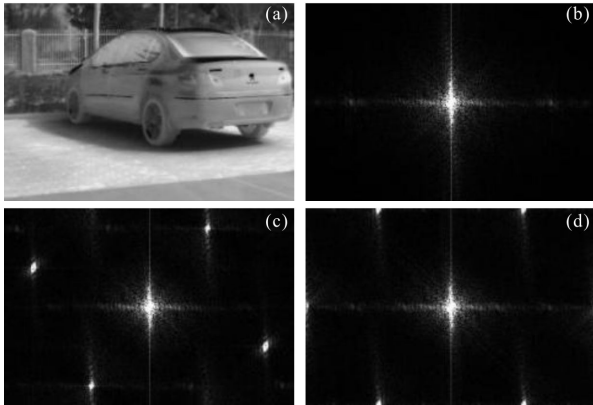


图 10 (a) “汽车”的红外强度图像; (b) 图(a)对应的对数频谱图; (c) 图 9(a)阵列对应的对数频谱图;(d) 图 9(b)阵列对应的对数频谱图

Fig.10 (a) Infrared intensity image of "car"; (b) Logarithmic spectrum corresponding to (a); (c) Logarithmic spectrum corresponding to the array in Fig.9(a); (d) Logarithmic spectrum corresponding to the array in Fig.9(b)

图 11 是利用图9(b)所示的 2×4 阵列得到的实际场景偏振马赛克和去马赛克图像。

$$S_{NewMPA1} = \begin{bmatrix} FS_0' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & FS_1' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & FS_2' \\ 0 & FS_2' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & FS_1' & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$S_{NewMPA2} = \begin{bmatrix} FS_0' & 0 & FS_1' & 0 \\ 0 & FS_2' & 0 & FS_2' \end{bmatrix} \quad (9)$$



(a) 原始图像
(a) Original image



(b) 偏振马赛克图像
(b) Polarization mosaic image



(c) 去马赛克图像
(c) Demosaiced image

图 11 用图 9(b)所示的 2×4 阵列得到的实际场景结果图
Fig.11 Result map of actual scene using the 2×4 array in Fig.9(b)

4 结 论

随着偏振成像技术在各个领域的应用日益广泛，传统的偏振成像方式的局限性逐渐凸显，新型 MPA 成像技术应运而生。文中按偏振片加工工艺的不同回顾了现有 MPA 成像技术的实现方式，利用衍射和等效介质理论提出了微偏振片参数设计方法，并提出了 MPA 联合编解码设计方法。实验结果表明，阵列的编解码设计方式的选择将会对偏振信息的获取性能产生较大影响，应结合具体应用需求设计 MPA 的模式。文中的工作为 MPA 成像技术的进一步推广应用奠定了基础。

参 考 文 献：

[1] Zhao Yongqiang, Pan Quan, Cheng Yongmei. Imaging Spectropolarimetric Remote Sensing and Application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
赵永强,潘泉,程咏梅. 成像偏振光谱遥感及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

[2] Guo Hong, Gu Xingfa, Xie Donghai. et al. A review of atmospheric aerosol research by using polarization remote sensing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(7): 1873-1880. (in Chinese)
郭红, 顾行发, 谢东海, 等. 大气气溶胶偏振遥感研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1873-1880.

[3] Zhao Y, Zhang L, Pan Q. Spectro -polarimetric imaging for anomaly epithelial tissue detection [M]//Sequence and Genome Analysis: Methods and Applications (CreateSpace, 2011), 2011: 297-330.

[4] Chen Xingfen, Gu Xingfa, Cheng Tianhai. et al. Simulation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sunlight [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31

- (6): 1648–1653. (in Chinese)
陈兴峰, 顾行发, 程天海, 等. 真实海洋表面的太阳耀光偏振辐射特性仿真与分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1648–1653.
- [5] Gong Jieqiong, Zhan Haigang, Liu Dazhao. A review on polarization information in remote sensing detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 1088–1095. (in Chinese)
弓洁琼, 詹海刚, 刘大召. 遥感遥测中偏振信息的研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(4): 1088–1095.
- [6] Yan Lei, Guan Guixia, Chen Jiabin. The bionic orientation mechanism in the skylight polarization pattern [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009(4): 616–620. (in Chinese)
晏磊, 关桂霞, 陈家斌, 等. 基于天空偏振光分布模式的仿生导航定向机理初探 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(4): 616–620.
- [7] Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobing, et al. Star observation based on polarization information in day time [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2009(4): 616–620. (in Chinese)
叶松, 方勇华, 孙晓兵, 等. 一种基于偏振信息的恒星白天观测方法 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3): 222–226.
- [8] Zhao Y, Peng Q, Yi C, et al. Multiband polarization imaging [J]. *Journal of Sensors*, 2015, 501: 161973.
- [9] Xu X, Kulkarni M, Nehorai A, et al. A correlation-based interpolation algorithm for division-of-focal-plane polarization sensors [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2012: 83640L–83640L–8.
- [10] Zhang Zhigang. Measurements of polarization and phase based on pixelated micro-polarizer array [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
张志刚. 基于微偏振片阵列的实时偏振和相位信息测量技术 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [11] Zhao X, Boussaid F, Bermak A, et al. High-resolution thin "guest-host" micropolarizer arrays for visible imaging polarimetry [J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5565–5573.
- [12] Myhre G, Hsu W L, Peinado A, et al. Liquid crystal polymer full-stokes division of focal plane polarimeter [J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27393–27409.
- [13] Bomzon Z, Kleiner V, Hasman E. Formation of radially and azimuthally polarized light using space-variant subwavelength metal stripe gratings [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(11): 1587–1589.
- [14] Bomzon Z, Kleiner V, Hasman E. Space-variant polarization state manipulation with computer-generated subwavelength metal stripe gratings [J]. *Optics Communications*, 2001, 192(3): 169–181.
- [15] Bomzon Z, Kleiner V, Hasman E. Computer-generated space-variant polarization elements with subwavelength metal stripes [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(1): 33–35.
- [16] Lajunen H, Turunen J, Tervo J. Design of polarization gratings for broadband illumination [J]. *Optics Express*, 2005, 13(8): 3055–3067.
- [17] Brock N, Hayes J, Kimbrough B, et al. Dynamic interferometry [C]//Optics & Photonics 2005. International Society for Optics and Photonics, 2005: 58750F–58750F–10.
- [18] Liao Yanbiao. Polarized Light [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [19] Zhao Y, Yi C, Kong S G, et al. Multi-band Polarization Imaging and Applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press -Springer Press, 2015.
- [20] Zhao Y, Liu W, Kong S G, et al. Design and performance analysis of infrared micro-polarizer array [C]//CCC, 2015.
- [21] Li Y, Hao P, Lin Z. The frequency structure matrix: A representation of color filter arrays [J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2011, 21(1): 101–106.
- [22] Wang J, Zhang C, Hao P. New color filter arrays of high light sensitivity and high demosaicking performance [C]//Image Processing (ICIP), 2011 18th IEEE International Conference on. IEEE, 2011: 3153–3156.
- [23] Hao P, Li Y, Lin Z, et al. A geometric method for optimal design of color filter arrays [J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2011, 20(3): 709–722.