

可见光偏振成像系统对低对比度目标的探测

胡冬梅^{1,2}, 刘 泉^{1*}, 牛国成^{1,2}

¹长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

²北华大学电气信息工程学院, 吉林 长春 132021

摘要 为实现低对比度、复杂背景下隐蔽目标的探测,搭建了双液晶相位可变延迟器(LCVR)的分时全偏振成像系统,提出了基于最小2-范数条件数的系统中2个LCVR相位延迟量控制的最优化组合方案。为探测隐蔽目标的真实偏振状态,在该组合方案设置下标定得到了系统仪器矩阵,并对隐藏在树阴下的绿色涂层目标进行了野外成像实验。实验结果表明,普通强度图像中目标与背景的对比度几乎为零,而经反演得到的 S_0 图像中目标与背景对比度为0.2525,结果进一步证明,该分时偏振成像系统可以有效地实现复杂背景下低对比度目标的探测。

关键词 成像系统; 偏振成像; 斯托克斯矢量; 液晶相位可变延迟器; 图像增强

中图分类号 TH744 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.061101

Low Contrast Target Detection Based on Visible Light Polarization Imaging System

Hu Dongmei^{1,2}, Liu Quan¹, Niu Guocheng^{1,2}

¹College of Electronic Information Engineering, Changchun University Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²College of Electrical and Information Engineering, Beihua University, Changchun, Jilin 132021, China

Abstract In order to detect the low contrast targets in the complicated background, the time division full polarization imaging system based on dual liquid crystal variable retarders (LCVR) is developed, and an optimum combination scheme based on the minimum 2-norm is proposed in the control of LCVR phase retardation. The system instrument matrix is calibrated with the optimum phase retardation combination, and the field imaging experiment is carried out when the green coating targets are hidden in the shade. The experimental result shows that the contrast between the target and its background is almost zero in the ordinary intensity image and 0.2525 in the S_0 image obtained by inversion. The achieved result further proves that the system can effectively realize low-contrast target detection in complex background.

Key words imaging systems; polarization imaging; Stokes vector; liquid crystal variable retarder; image enhancement

OCIS codes 110.5405; 200.4860; 230.3720; 100.2980

1 引言

偏振成像探测技术作为一种新兴的成像探测手段,利用目标和背景的偏振特性差异,通过光电成像器件获取目标景物辐射的空间信息、光谱信息和偏振信息,将光强检测的三维(光强、光谱、空间)信息扩展到七维[光强、光谱、空间、偏振度(DOP)、偏振相角(AOP)、偏振椭圆率和偏振方向]^[1],特别适用于雾霾、烟尘、复杂背景等恶劣环境下的隐身、伪装、虚假目标的探测^[2-3]。

随着液晶技术的发展,液晶相位可变延迟器(LCVR)已被应用于偏振成像技术中,它具有驱动电压小、

收稿日期: 2017-01-20; **收到修改稿日期:** 2017-02-15

基金项目: 国家 973 计划(613225)、国家自然科学基金(91338116)

作者简介: 胡冬梅(1979—),女,博士,讲师,主要从事偏振成像技术方面的研究。E-mail: haitianme@163.com

* **通信联系人.** E-mail: liuquancust@126.com

控制好、功耗小、响应速度快、抗干扰能力强、价格便宜和体积小等优点^[4]。1997年, Goloub等^[5]研制了测量地球发射光谱的偏振和方向性仪器, 利用旋转偏振片实现光谱和线偏振信息的探测, 但机械装置带来了较大的机械误差; 1990年, Cariou等^[6]设计了LCVR与声光可调谐滤光片(AOTF)相结合的电调谐光谱偏振成像仪, 实现了500~1000 nm光谱范围内的偏振成像, 成功地应用于运输系统机器视觉和军事目标识别系统。Taylor等^[7]和Devaraj等^[8]先后设计了1块LCVR组合1块AOTF、1块AOTF组合2块LCVR的斯托克斯偏振光谱成像仪, 能够覆盖从紫外线到近红外的光谱范围。自2011年以来, 国内的北京空间机电研究所^[9]、中北大学^[10]、西北工业大学^[11]和北京航空航天大学^[12]等研制的偏振成像系统也包含两个LCVR器件, 该系统对LCVR取特定的相位延迟量来实现全偏振成像探测。

本文从系统的稳定性及探测结果是否反映探测目标偏振状态的真实性的出发, 研制了基于双LCVR的分时全偏振成像系统, 提出了双LCVR全偏振成像系统中两个LCVR相位延迟量控制的优化组合方案, 在系统优化组合设置下标定了系统仪器矩阵, 并进行了野外成像探测实验。

2 全偏振成像原理

偏振成像系统主要由2块液晶相位延迟器(LCVR₁、LCVR₂)及控制器、检偏片P和CCD相机组成。通过调整LCVR的驱动电压组合, 由CCD相机探测得到反映不同目标偏振信息的偏振态图像, 全偏振成像原理如图1所示。

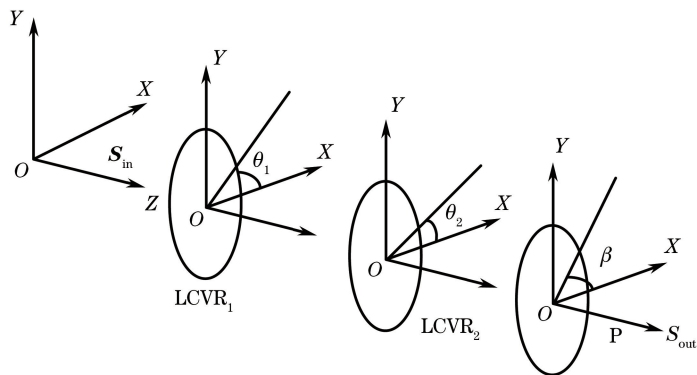


图1 全偏振成像系统原理图

Fig. 1 Schematic of full polarization imaging system

若入射光的斯托克斯矢量为 $\mathbf{S}_{in} = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$, 经图1的光学器件后, 出射光的斯托克斯矢量为 $\mathbf{S}_{out} = [I \ Q \ U \ V]^T$, S_0 和 I 表示总光强, S_1 和 Q 表示水平与垂直线偏光强度之差, S_2 和 U 表示 $\pm 45^\circ$ 线偏光强度之差, S_3 和 V 表示右旋圆偏振光与左旋圆偏振光强度之差。由斯托克斯-Muller理论可得:

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M} \mathbf{S}_{in} = \mathbf{M}_P(\beta) \mathbf{M}_2(\theta_2) \mathbf{M}_1(\theta_1) \mathbf{S}_{in}, \quad (1)$$

式中偏振片P、LCVR₂和LCVR₁的Muller矩阵分别为 \mathbf{M}_P 、 \mathbf{M}_2 、 \mathbf{M}_1 , 方位角分别为 $\beta=0^\circ$ 、 $\theta_2=45^\circ$ 、 $\theta_1=0^\circ$ 。

$$\mathbf{S}_{out} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_2 & 0 & -\sin \delta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \delta_2 & 0 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_1 & \sin \delta_1 \\ 0 & 0 & -\sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 δ_1 、 δ_2 为LCVR₁、LCVR₂的相位延迟量。

由(2)式可知, CCD能够探测到的光强是矩阵 \mathbf{M} 的第一行与 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 乘积的结果, 即

$$I = \frac{1}{2} (S_0 + \cos \delta_2 \cdot S_1 + \sin \delta_1 \cdot \sin \delta_2 \cdot S_2 - \sin \delta_2 \cdot \cos \delta_1 \cdot S_3). \quad (3)$$

这样, 改变4组LCVR相位延迟量组合, 4次测量出射光束的光强 I_k ($k=1, 2, 3, 4$), 根据(3)式可得到出射光强 \mathbf{I} 和入射光 \mathbf{S}_{in} 关系式为

$$\mathbf{I} = \mathbf{A} \mathbf{S}_{in}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{I} 为 4 次测量的光强值组成的 4×1 的矩阵, 仪器矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \delta_{21} & \sin \delta_{21} \sin \delta_{11} & -\sin \delta_{21} \cos \delta_{11} \\ 1 & \cos \delta_{22} & \sin \delta_{22} \sin \delta_{12} & -\sin \delta_{22} \cos \delta_{12} \\ 1 & \cos \delta_{23} & \sin \delta_{23} \sin \delta_{13} & -\sin \delta_{23} \cos \delta_{13} \\ 1 & \cos \delta_{24} & \sin \delta_{24} \sin \delta_{14} & -\sin \delta_{24} \cos \delta_{14} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\delta_{i,j}$ 为 LCVR 的相位延迟量, i ($i=1,2$) 为 LCVR 的标识, j ($j=1,2,3,4$) 为 LCVR 的调制次数。

如果存在矩阵 \mathbf{A} 的逆矩阵 \mathbf{A}^{-1} , 利用矩阵反演, 由(4)式可得 $\mathbf{S}_{\text{in}} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{I}$, 从而计算出入射光偏振态信息图像为

$$\alpha_{\text{DOP}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \times 100\%, \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{AOP}} = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_2}{S_1}, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \frac{S_2}{S_1} \leq \frac{\pi}{2}, \quad (7)$$

式中 α_{DOP} 和 α_{AOP} 分别为图像的 DOP 和 AOP。

3 双 LCVR 相位延迟量优化组合

如(5)式所示, 系统的仪器矩阵 \mathbf{A} 是由 2 个 LCVR 的 4 组相位延迟量组合情况决定的。假设仪器矩阵 \mathbf{A} 存在一个误差项 $\Delta \mathbf{A}$, \mathbf{I} 为出射光强测量的精确值, 测量误差项为 $\Delta \mathbf{I}$, 产生解的扰动为 $\Delta \mathbf{S}$, 则扰动非齐次线性方程为^[13]

$$(\mathbf{A} + \Delta \mathbf{A}) \Delta \mathbf{S} = \mathbf{I} - \Delta \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}}. \quad (8)$$

利用向量范数和矩阵范数的性质可得

$$\frac{\|\Delta \mathbf{S}\|}{\|\mathbf{S}\|} \leq \frac{\kappa(\mathbf{A})}{1 - \kappa(\mathbf{A})(\|\Delta \mathbf{A}\| / \|\mathbf{A}\|)} \left(\frac{\|\Delta \mathbf{I}\|}{\|\mathbf{I}\|} + \frac{\|\Delta \mathbf{A}\|}{\|\mathbf{A}\|} \right), \quad (9)$$

式中 $\|\Delta \mathbf{I}\| / \|\mathbf{I}\|$ 和 $\|\Delta \mathbf{A}\| / \|\mathbf{A}\|$ 都是常数, 如果系统矩阵 \mathbf{A} 的条件数 $\kappa(\mathbf{A})$ 较小, $\Delta \mathbf{A}$ 和 $\Delta \mathbf{I}$ 对解 $\|\Delta \mathbf{S}\|$ 的值影响也较小。为使系统稳定、减小解的误差, 在实际优化 \mathbf{A} 矩阵时, 应满足 $|\det(\mathbf{A})| \neq 0$, $|\det(\mathbf{A})|$ 值大而 $\kappa(\mathbf{A})$ 的值小。

由(5)式可以看出, 控制仪器矩阵 \mathbf{A} 的参数多, 且计算关系复杂多样, 很难优化, 现减少 LCVR 相位延迟量的改变次数, 假设 $\delta_{12} = \delta_{11}$, $\delta_{14} = \delta_{13}$, $\delta_{22} = -\delta_{21}$, $\delta_{24} = -\delta_{23}$, 得到系统仪器矩阵 \mathbf{A} 的行列式值为

$$\det(\mathbf{A}) = 4 \sin \delta_{21} \sin \delta_{23} (\cos \delta_{21} - \cos \delta_{23}) \sin(\delta_{13} - \delta_{11}). \quad (10)$$

经仿真可知, 要使 $\det(\mathbf{A})$ 最大, 则应满足 $\delta_{13} - \delta_{11} = \pi/2$ 。在此条件下, 当 $\delta_{21} = 54.736^\circ$, $\delta_{22} = -54.736^\circ$, $\delta_{23} = 125.264^\circ$, $\delta_{24} = -125.264^\circ$ 时, $\det(\mathbf{A})$ 达到最大值 3.0792。而此时 \mathbf{A} 的条件数 $\kappa(\mathbf{A})$ 可达到最小值 1.7319。为了保证 S_2 和 S_3 参数具有相同的误差, 选取的最优相位延迟量组合为 $(135^\circ, \pm 54.736^\circ)$ 、 $(225^\circ, \pm 125.264^\circ)$, 通过实验定标 LCVR 的相位延迟特性得到该角度对应的 LCVR 驱动电压^[14], 在此驱动电压组合下标定得到的归一化仪器矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.6330 & 0.3684 & 0.6426 \\ 0.9964 & 0.4045 & -0.8507 & -0.2492 \\ 0.9690 & -0.6324 & -0.4801 & 0.5374 \\ 0.9740 & -0.4971 & 0.5360 & -0.7864 \end{bmatrix}.$$

这样, $\det(\mathbf{A}) = 3.0864 \neq 0$, 存在逆矩阵, 条件数 $\kappa(\mathbf{A}) = 2.0864$, 满足成像系统的基本要求。

4 实验装置及偏振实验分析

4.1 实验装置

全偏振成像系统实验装置如图 2 所示, 为了与普通成像方法成像效果进行比较, 该装置还增加了一台普通相机。



图2 实验装置

Fig. 2 Experimental device

系统主要元件有偏振片 P、LCVR、CCD 相机和计算机。偏振片 P 的消光比为 5×10^5 , 通光口径为 20 mm; LCVR 为瑞士 Arcoptix 公司产品, 通光孔径为 20 mm, 具有补偿功能, 波长范围为 350~700 nm, 输入电压为 0~8 V 可调; CCD 相机采用大恒工业数字 CCD 相机 (Daheng-SV1400FC); 计算机 (英特尔酷睿 i5 2450 M 处理器, 主频为 2.5 GHz), 采用 Win7 64 位操作系统, 是整个成像探测系统的控制中心。成像谱段范围为 350~700 nm。

4.2 成像实验及结果分析

4.2.1 成像实验

实验目标为 $1.0 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 喷涂深绿色漆的钢板, 背景为晴天绿色草坪及树丛。利用普通相机探测图像, 通过(4)式计算得到的 S_0 图像如图 3(a)、3(b)所示, 通过(6)~(7)式计算得到的 DOP 灰度图像和 AOP 灰度图像如图 3(c)、3(d)所示。

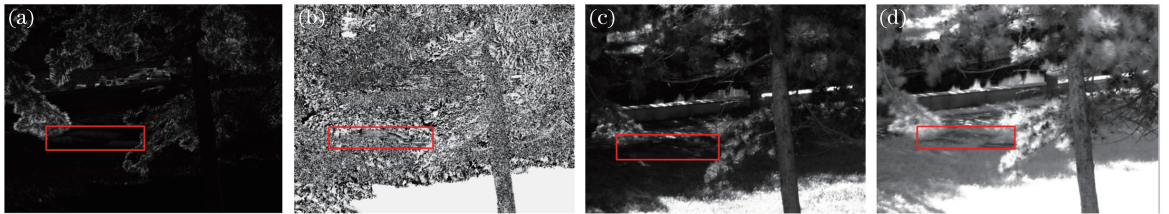
图3 树丛阴影下涂层目标图像。(a)普通相机强度图像;(b) S_0 图像;(c) DOP 图像;(d) AOP 图像

Fig. 3 Images of the coating target in the shadow of trees. (a) Intensity image of common camera;

(b) S_0 image; (c) DOP image; (d) AOP image

由图 3(a)可知, 在普通相机探测图像中, 目标与背景颜色相同、亮度相近, 对比度几乎为零, 涂层钢板目标不能被识别; 在图 3(b)和 3(c)中, 很容易将物体目标从背景中区分出来, 图 3(b)中目标的灰度值比背景的灰度值小, 而图 3(c)中正好相反, 这是由于目标和背景材料不同引起的 DOP 差异导致的, 且目标的边缘特性好; 图 3(d)中目标显示不明显, 是噪声干扰造成的。

4.2.2 结果分析

对比度是衡量目标与背景差异大小的重要指标, 采用目标与背景在探测图像中的平均灰度值差的绝对值和目标与背景平均灰度值之和的比来计算对比度, 即

$$C = \frac{|g_t - g_b|}{g_t + g_b}, \quad (11)$$

式中 C 表示目标与背景的对比度, g_t 、 g_b 分别表示目标区域和背景区域的平均灰度值。

为较准确地确定目标与背景的对比度, 现取普通相机图像和 S_0 图像中目标周围区域来计算对比度, 如图 4 所示, 红色区域为目标和背景。

经过计算, 图 4(a)中目标与背景的对比度为 0.0092, 而图 4(b)中目标与背景的对比度为 0.2525, 由于计算时目标选择要比实际目标小一些, 故各对比度的实际值应比计算值更大一些, 因此, 该系统适合于目标与背景处于低对比度情况下的目标探测。

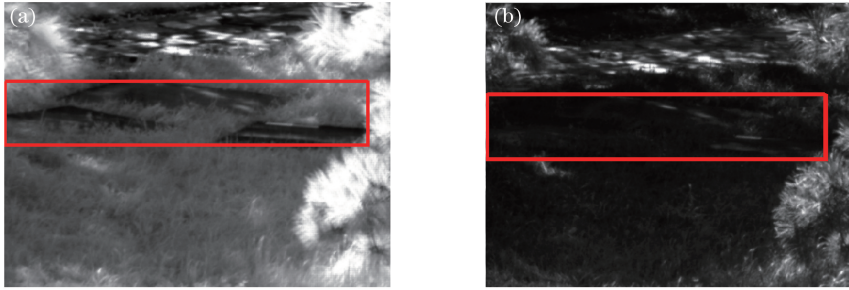


图4 截取图像。(a)普通相机图像;(b) S_0 图像

Fig. 4 Intercepted images. (a) Common camera image; (b) S_0 image

5 结 论

阐述了基于双 LCVR 的分时全偏振成像的原理,搭建了成像系统,在系统相位延迟量最优组合方案下标定了系统仪器矩阵,并进行了野外实验。与普通强度图像相比,偏振 S_0 图像中目标与背景的对比度大大提高,能够获得传统强度图像中不能显示的更多细节信息,该方案成为实现低对比度条件下的目标探测的有效手段。该系统的光学系统稳定、结构紧凑轻便,实现了全斯托克斯偏振成像探测,并保证偏振成像的 4 个通道视场共轴,是对光强探测技术的有益补充。

参 考 文 献

- [1] Wang Jun, Ding Na, Li Jianjun, *et al.* Infrared polarization imaging: detection and recognition of camouflage target [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 441-445.
王 军, 丁 娜, 李建军, 等. 红外偏振成像对伪装目标的探测识别研究 [J]. *应用光学*, 2012, 33(3): 441-445.
- [2] Li Shujun, Jiang Huilin, Zhu Jingping, *et al.* Development status and key technologies of polarization imaging detection [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803-809.
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.
- [3] Xu Feifei, Zeng Chaoyang, Chen Hang. Research on active laser polarization imaging of vehicle targets under complicated background [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051103.
徐飞飞, 曾朝阳, 陈 杭. 复杂地物背景下的车辆目标激光主动偏振成像研究 [J]. *激光与光电子学进展*. 2016, 53(5): 051103.
- [4] Li Kewu, Wang Zhibin, Zhang Rui, *et al.* Study of birefringence dispersion based on liquid crystal variable retarder [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0108001.
李克武, 王志斌, 张 瑞, 等. 液晶可变延迟器的双折射色散研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0108001.
- [5] Goloub P, Chepfer H, Herman M, *et al.* Use of polarization for clouds study [C]. *SPIE*, 1997, 3121: 330-341.
- [6] Cariou J, Jeune B L, Lotrian J, *et al.* Polarization effects of seawater and underwater targets [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(11): 1689-1695.
- [7] Taylor J S, Davis P S, Wolff L B. Underwater partial polarization signatures from the shallow water real-time imaging polarimeter (SHRIMP) [C]. *SPIE*, 2003, 5089: 296-311.
- [8] Devaraj R, Sankarasubramanian K, Surekha K. Integration and calibration of a multi slit spectropolarimeter [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(1): 232-240.
- [9] Zhao Haibo, Li Huan, Lin Yuling, *et al.* Research on spectral polarization imaging system based on static modulation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(4): 1129-1133.
赵海博, 李 欢, 林栩棱, 等. 静态调制的光谱偏振成像系统 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(4): 1129-1133.
- [10] Xue Peng, Wang Zhibin, Zhang Rui, *et al.* Highly efficient measurement technology based on hyperspectropolarimetric imaging [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(8): 0811001.
薛 鹏, 王志斌, 张 瑞, 等. 高光谱全偏振成像快捷测量技术研究 [J]. *中国激光*. 2016, 43(8): 0811001.
- [11] Zhao Yongqiang, Pan Quan, Cheng Yongmei. Imaging spectropolarimetric remote sensing and application [M].

Beijing: National Defense Industry Press, 2011.

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.

- [12] 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.
- [13] Ambirajan A, Look D C, Jr. Optimum angles for a polarimeter: part I[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6): 1656-1664.
- [14] Hu Dongmei, Song Lu, Niu Guocheng. New method to measure phase retardation of wave plates based on SVM[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(7): 1517-1523.
胡冬梅, 宋 路, 牛国成. 基于支持向量机的波片相位延迟测量新方法[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(7): 1517-1523.