

组合沃拉斯顿棱镜组的目标偏振检测方法

李居尚, 战荫泽*, 张立东

(长春电子科技学院 电子工程学院, 吉林 长春 130013)

摘要: 为了提高静态偏振光谱成像系统光谱分辨率并获得更好的目标识别能力, 设计了正交组合沃拉斯顿棱镜组结构, 配合静态相位调制技术完成了目标的偏振光谱成像。该技术采用了多级棱镜组合的方法在不扩大原有静态干涉棱镜尺寸的条件下扩大了空间光程差变化范围, 从而提升了静态光谱分辨率。通过相位调制与图像周期性匹配的方法完成了二维图像与光谱分离。仿真分析了结构尺寸与调制度对光谱分辨率的函数关系。实验采用计算模拟验证了二维图像与光谱分离的可行性。在晴天与阴天两种不同状态下, 测试了 30.0 cm 铝板目标的信号对比度, 采用偏振光谱成像并完成数据提取的测试结果均值为 53.4% 和 49.3%, 而基于强度图像的测试结果均值为 24.4% 和 14.1%。文中设计可以改善目标识别效果, 提高光谱分辨精度。

关键词: 光谱成像; 偏振光谱; 沃拉斯顿棱镜; 对比度

中图分类号: O434.13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210339

Target polarization detection method of combined Wollaston prism group

Li Jushang, Zhan Yinze*, Zhang Lidong

(College of Electronic Engineering, Changchun College of Electronic Technology, Changchun 130013, China)

Abstract: In order to improve the spectral resolution of the static polarization spectrum imaging system and obtain better target recognition ability, the orthogonal combined Wollaston prism group structure was designed, and the static phase modulation technology was used to complete the polarization spectrum imaging of the target. This technology used a multi-stage prism combination method to expand the range of spatial optical path difference without expanding the size of the original static interference prism, thereby improving the static spectral resolution. The two-dimensional image and the spectrum were separated by the method of phase modulation and image periodic matching. The function relationship between the structure size and the modulation degree on the spectral resolution was analyzed by simulation. The feasibility of the separation of the two-dimensional image and the spectrum were verified by computational simulation. The signal contrast of the 30.0 cm aluminum plate target was tested under two different conditions: sunny and cloudy. The polarization spectrum imaging was used and data extraction were 53.4% and 49.3%, while the mean of test result based on intensity image was 24.4 % and 14.1%. This design can improve the target recognition effect and increase the spectral resolution accuracy.

Key words: spectral imaging; polarization spectrum; Wollaston prism; contrast

收稿日期: 2021-05-30; 修订日期: 2021-06-29

基金项目: 国家自然科学基金 (61171179); 吉林省高教学会高教科研课题 (JGJX2019D466, JGJX2018D283)

作者简介: 李居尚, 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为数字电子技术、大数据分析等。

通讯作者: 战荫泽, 男, 副教授, 主要研究方向为检测技术。

0 引言

光谱成像可以将二维可见光图像与光谱信息相结合,并且可以根据应用需要导入偏振光谱信息,该技术由于可以克服可见光成像中目标与背景混叠、伪装等问题,通过偏振信息、光谱信息对比等可大幅提升测试区域对比度与信噪比,故其成为目标识别的一个重要研究支脉^[1]。由于光谱数据提取与分析算法相对成熟,并且对目标识别的提升效果由光学系统硬件极限所控制,故对光学系统硬件结构的改进成为了研究热点。

光谱偏振成像要完成光谱获取与偏振成像两个主要功能,即同时采集区域光谱信息与偏振态信息^[2]。传统方法中一般采用机械式调节方式完成数据获取状态的转换,例如采用旋转滤光片的方式^[3]等。Scott 等^[4]人提出了利用液晶调制的方式对 Sagnac 棱镜进行控制,实现光谱与偏振数据的同时采集,但液晶控制过程中切换时间长,实时性差,并且光谱范围受限。Ivanov 等人^[5]采用阶梯平面反射镜扩大了静态棱镜结构的光谱扫描范围。美国亚利桑那大学^[6]曾报道一种基于斯托克斯定律的偏振成像光谱系统,采用 1/4 波片配合线偏振器检测待测区域的斯托克斯参量,从而完成偏振状态提取。Patterson^[7]提出了基于阵列组合的方式扩大静态干涉范围;穆廷魁等人^[8]对偏振成像系统中的干涉定位面及对应角度进行了精确计算。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所采用棱镜/光栅/棱镜的光学结构实现了通过光栅进行光谱获取^[9]。田二明等人^[10]采用固体斜楔实现了静态傅氏变换,空间光谱分辨率达到 73 cm^{-1} 。裴琳琳等人^[11]优化了双阿米西棱镜结构,通过多狭缝实现了偏振成像。对比众多研究成果,虽各有优势,但静态光谱分辨率与图像获取速度及结构复杂程度仍是研究的重点^[12]。文中提出了一种基于正交沃拉斯顿棱镜组合的空域光谱展宽方法用于获取目标区域光谱数据,再结合偏振态信息完成目标偏振参数获取,在设计了光学系统的基础上对目标测试结果进行了分析。

1 偏振成像系统设计

为了在有限的尺寸范围内获得更多的偏振光谱

信息,采用多沃拉斯顿棱镜^[13]拼接的方式得到更宽范围的光程变化量,从而提高系统的静态光谱分辨率。并且在此基础上,通过在同轴光学系统中放置相同的沃拉斯顿棱镜组,并采用正交对齐的方式,由此可以在两个正交方向上同时完成偏振光分离,从而通过二次偏振拓展偏振光谱信息量,达到提高偏振成像效果的目的。结构设计如图 1 所示。

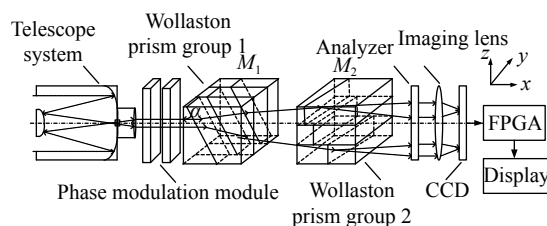


图 1 基于组合沃拉斯顿棱镜的偏振成像系统

Fig.1 Polarization imaging system based on combined Wollaston prism

由图 1 所示,偏振成像系统由望远系统、相位调制模块、沃拉斯顿棱镜组 1、沃拉斯顿棱镜组 2、检偏器、成像透镜、CCD 以及 FPGA 与显示模块组成。为了保证测试光通量强及视场范围足够大,并确保入射偏振模块的光是平行光,兼顾高空间分辨率和大光通量的要求。采用望远镜系统作为前置光学系统。经过压缩整形的入射光通过起偏器后进入沃拉斯顿棱镜组 1,沃拉斯顿棱镜组 1 由三个子棱镜组成,每个子棱镜中分束面倾角一致,但是位置递增,形成连续递增效果,也可以理解成为一个长的分束面被拆分成三个子棱镜后拼接在一起,从而在尺寸不变的条件下通过拼接增大了静态光谱扫描范围。经过沃拉斯顿棱镜组 1 后光线分为 o 光和 e 光。在通过与沃拉斯顿棱镜组 1 尺寸相同但相互垂直的沃拉斯顿棱镜组 2,实现二次分光。最终通过检偏器、成像透镜将目标区域光波成像于 CCD 上,获得的偏振光谱图像由 FPGA 采集计算并显示。

2 理论分析

偏振光的状态可以采用 Stokes 矢量^[14]进行表达,设偏振角度分别是 0° 、 45° 、 90° 和 -45° ,则光强表示为 I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° 和 I_{-45° 。总光强为 S_0 ,与之对应的存在 0° 与 90° 的光强差 S_1 、 45° 与 -45° 的光强差 S_3 ,左旋圆偏振 I_l 与右旋圆偏振 I_r 的光强差 S_3 ,则有:

$$\begin{cases} \vec{S}_0 = \vec{I}_{0^\circ} + \vec{I}_{90^\circ} = \vec{I}_{45^\circ} + \vec{I}_{-45^\circ} = \vec{I}_l + \vec{I}_r \\ \vec{S}_1 = \vec{I}_{0^\circ} - \vec{I}_{90^\circ}, \vec{S}_2 = \vec{I}_{45^\circ} - \vec{I}_{-45^\circ} = \vec{I}_l - \vec{I}_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 为 4 个 Stokes 分量, 分别表示光强、两个相互垂直的偏振分量以及圆偏振分量^[15]。

2.1 偏振传输表达

对沃拉斯顿棱镜组 1 和 2 的分析是一致的, 只是在角度上旋转了 90° , 为避免赘述本节只讨论沃拉斯顿棱镜组 1 的传输表达。当入射光经过相位调制模块时, 产生相位延迟量 δ_1 和 δ_2 , 可表达为:

$$\begin{cases} \delta_1(\nu) = 2\pi\nu L_1 \\ \delta_2(\nu) = 2\pi\nu L_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ν 表示波数; L_1 和 L_2 分别表示经过相位调制模块的光程差。

则对于沃拉斯顿棱镜组 1(M_1) 和沃拉斯顿棱镜组 2(M_2) 而言, 其传递函数为:

$$\begin{cases} M_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ M_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\phi & \sin 2\phi & 0 \\ \cos 2\phi & \cos^2 2\phi & \sin 2\phi \cos 2\phi & 0 \\ \sin 2\phi & \sin 2\phi \cos 2\phi & \sin^2 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ 为线偏振光的快轴和光学系统中 y 轴的夹角; ϕ 为线偏振光的快轴和光学系统中 x 轴的夹角。由公式 (3) 可知, 传递函数仅与夹角 θ 有关, 故通过设计合适的沃拉斯顿棱镜组夹角就能获得合适的传输函数, 由此再将沃拉斯顿棱镜组 2 引入后, 就能得到一组相关的传输函数, 从而使偏振与光谱信息同时被解调。

2.2 光谱分辨能力分析

为了保证传感器能接收到足够的光能量, 子棱镜的个数不宜设置过多, 文中系统采用三个, 由于单个沃拉斯顿棱镜的光谱分辨能力由静态干涉棱镜的最大光程差决定^[16], 故沃拉斯顿棱镜组 1 和沃拉斯顿棱镜组 2 叠加形成的光谱分辨率由两组最小光程差与两组最大光程差的范围决定, 即:

$$\begin{cases} \Delta(h, \alpha) \approx 2h(n_o - n_e) \tan \alpha \\ R = (3\Delta_1)^{-1} (3\Delta_2)^{-1} = (9\Delta)^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: h 表示两束光之间的距离 (指当光从第一级沃拉斯顿棱镜出射为 o 光和 e 光时, 两束光之间的距离); α 表示沃拉斯顿棱镜分束面夹角; n_o 和 n_e 为 o 光

与 e 光在棱镜中的折射率; Δ_1 和 Δ_2 分别为沃拉斯顿棱镜组 1 和 2 的子棱镜的最大光程差, 由于两个结构一致, 故其相等表示为 Δ 。

3 仿真分析

为了分析不同参数变化对系统光谱分辨能力的影响, 采用 MATLAB 对影响系统光谱分辨能力的两个主要参数进行仿真分析, 将沃拉斯顿棱镜等效尺寸设为 D (由于对于棱镜而言, 决定其光谱分辨能力的是最大光程差的倒数, 而等效尺寸直接决定了光程差的大小, 故增加等效尺寸大小就能够提升光谱分辨率, 而等效尺寸在文中就是三个子棱镜按照首尾相连的方式合在一起后的总尺寸), 将晶体折射率调制度设为 Δn , 沃拉斯顿棱镜结构尺寸为 $2.0 \text{ cm} \times 2.0 \text{ cm}$, 沃拉斯顿棱镜分束面夹角 α 为 20.0° , 从而求解光程差 Δ 的变化范围, 则仿真结构如图 2 所示。

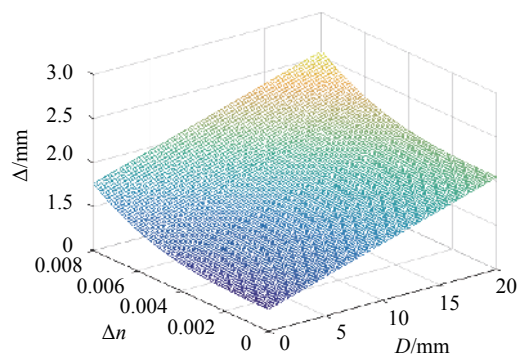


图 2 不同参数条件下的最大光程差分布

Fig.2 Distribution of maximum optical path difference under different parameter conditions

由图 2 可知, 当采用单个沃拉斯顿棱镜时, 可以理解为将 D 固定为一个具体数值, 从而得到一条曲线, 该曲线的变化范围就行可以控制的光谱分辨率波动范围。由此可见, 当需要得到不同的光谱分辨率时, 只要通过计算对应的等效尺寸 D 就能够计算得到需要扩展的子棱镜数量, 从而设计满足系统要求的沃拉斯顿棱镜组中子棱镜的个数与位置关系。采用两组正交放置的沃拉斯顿棱镜时, 其光谱可控范围就变成了两组可调制范围的叠加, 从而使整个光谱分辨能力得到了很好的提升, 以 $D=10 \text{ mm}$ 为例, 可调光程波动范围 $\Delta_{\max} - \Delta_{\min}$ 为 0.24 mm , 而采用正交双沃拉斯顿棱镜设计时, 其可调光程波动范围为 2.12 mm , 提升了

近 9 倍,这与公式 (4) 的理论分析结果基本一致。由此可知,采用文中系统的正交放置有助于提升整个系统的静态光谱扫描范围,即通过两组沃拉斯顿棱镜迭代的方式获得更宽的连续空间光程差。

4 实验测试

4.1 模拟分析

测试中图像探测器选用单色 CCD 相机,像元个数为 1550×1042 ,单个像元大小为 $6.25 \mu\text{m} \times 6.25 \mu\text{m}$,光谱范围为 $380 \sim 1100 \text{ nm}$ 。相位延迟模块采用折射率 0.00849 的 SiO_2 晶体,两块晶体有效厚度为 20.0 mm。沃拉斯顿棱镜 1 和沃拉斯顿棱镜 2 采用方解石制成,分束面夹角为 20.0° 。首先对待测目标进行计算机仿真模拟,目标为边长 30.0 cm 的正方形。由于同时获取偏振信息与光谱分布信息,故需要累积获取一个相位调制周期内所有的图像,共计 2 048 帧图像,其中包含了目标的二维图像信息,相应相位时刻的偏振信息,然后通过计算机对不同帧信号进行叠加与分离就可以获得目标的二维光谱图像与偏振参量信息。任意选取一帧的图像如图 3 所示。

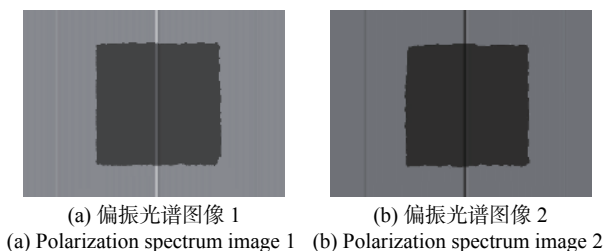


图 3 同一帧中的两组偏振光谱图像

Fig.3 Two sets of polarization spectrum images in the same frame

由图 3 可以看出,目标二维图像与干涉条纹叠加在一起,但是这个叠加状态是可以被分离的,因为干涉条纹是由于干涉形成的,干涉过程是因为相位调制实现的,只要将满足周期性的相位采样图像提取出来然后进行相互叠加就能将干涉条纹抵消,从而得到目标图像。同理,将半周期条件下的采样图像提取出来以后进行差分运算,就能够将干涉条纹增强,然后通过傅氏变换得到光谱分布。依据此思路,对两幅图像进行相加与相减处理,结果如图 4 所示。

如图 4(a) 所示,由在对应周期上的两幅帧图像进行相加处理后可以看见,原有的干涉条纹相互抵消了,虽然仍存在一定的背景强度,但是信噪比已经得

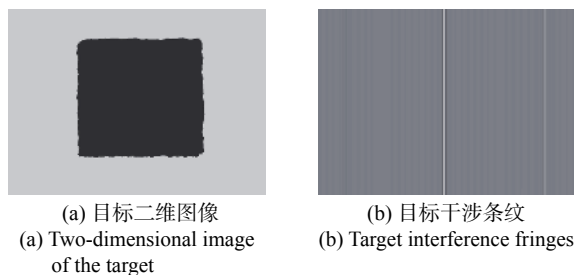


图 4 相加与相减对应帧图像的效果

Fig.4 Effect of adding and subtracting corresponding frame images

到的很好的改善。同时,如果采用多幅对应周期上的图像进行叠加的话,图像效果会变得更加清晰,故后期仅需要对相应帧数的图像进行累积即可。同理可见,图 4(b) 中干涉条纹的对比度也明显比图 3 中两组原有图像要清晰,这也是相减后总振幅虽然减小了,但由于信噪比相对增大而使图像进一步清晰的原因。

4.2 对比目标测试

对边长为 30.0 cm 的铝制正方形目标进行目标测试,为了量化对比文中系统偏振成像与传统二维强度图像之间的差异,分别将偏振图像与强度图像中的目标点强度均值与总强度均值进行求比例,由此量化对比相同目标在相同背景中的对比度。并且测试过程中,一次采用与测试系统光轴几乎垂直,一次采用与光轴位置偏转约 45° ,在不同距离的测试结果如图 5 所示。

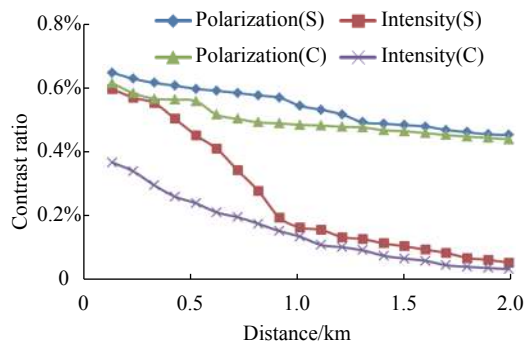


图 5 不同条件下两种方法的目标对比度比例

Fig.5 Target contrast ratio of the two methods under different conditions

图中包括 4 条测试曲线, Polarization (S) 表示在晴朗条件下测试得到的偏振测试结果,其中 S 表示 Sunny,晴朗条件; Polarization (C) 表示在阴天条件下测试得到的偏振测试结果,其中 C 表示 Cloudy,阴天条件; Intensity (S) 表示在晴朗条件下测试得到的强度测试结果; Intensity (C) 表示在阴天条件下测试得到的

强度测试结果。从总体分布情况可以看出,当距离增加的时候,两种方法的测试结果都是衰减的,但是衰减程度不同。Polarization (S) 和 Polarization (C) 在 2.0 km 内的对比度平均值分别为 0.534 和 0.493, 而 Intensity (S) 和 Intensity (C) 的对比度平均值仅为 0.244 和 0.141。可见采用偏振获取的目标强度与直接目标强度之间具有较为明显的差异,偏振系统获得的目标对比度比例均值明显高于强度图像的。并且不同测试条件表示了天气晴朗与阴天时两种结果,这两种测试天气对偏振测试结果基本没有影响,两条测试曲线均值接近。对于强度图像而言,阴天的测试效果相比晴朗时的测试效果降低了约 20%。在 1.0 km 以外,强度像的对比度比例全部小于 20.0%,说明距离对强度振幅的影响明显,而采用偏振成像的振幅对比度虽有下降,但幅度较小。

5 结 论

通过设计一种正交的多级的沃拉斯顿棱镜组,完成了静态空间光程差范围的拓展,实现了对目标偏振光谱成像。利用仿真计算完成了不同参数控制条件下,静态光程差变化范围的分析,预测了光谱提升效果。实验通过计算模拟分析验证了偏振光谱图像周期性匹配提升目标识别效果的可行性。实验在不同光照条件下对比了文中方法与传统强度测试方法的测试结果。结果显示,光谱分辨率由最大光程差计算结果可知,提升约 9 倍;采用偏振方法的目标对比度均值分别为 0.534 和 0.493,而基于强度的目标对比度均值分别为 0.244 和 0.141,可见性能提升约一倍以上。文中方法对提升静态偏振成像系统的光谱分辨能力和目标识别能力具有一定的优势。

参考文献:

- [1] Firby C J, Eiezzabi A Y. A magnetoplasmonic electrical-to-optical clock multiplier [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(5): 051111.
- [2] Chen Weili, Xu Wenbin, Wang Shuhua, et al. Research on coating materials detection and recognition based on infrared spectral polarization degree contrast [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20190445. (in Chinese)
- [3] Alali S, Vitkin I A. Optimization of rapid Mueller matrix imaging of turbid media using four photoelastic modulators with out mechanically moving parts [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(10): 103114.
- [4] Scott J S, Turner T S. Variable-retardance, Fourier-transform imaging spectropolarimeters for visible spectrum remote sensing [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(9): 1451-1458.
- [5] Ivanov E V. Static Fourier transform spectroscopy with enhanced resolving power [J]. *Applied Optics*, 2000, 2(2): 519-528.
- [6] Chan V C, Kudenov M, Liang C, et al. Design and application of the snapshot hyperspectral imaging Fourier transform (SHIFT) spectropolarimeter for fluorescence imaging[C]//SPIE, 2014, 8949: 2978-2982.
- [7] Patterson Brett A, Lenney James P, Sibbett Wilson, et al. Detection of benzene and other gases with an open-path, static Fourier-transform UV spectrometer [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(15): 3172-3175.
- [8] Mu Tingkui, Zhang Chunmin, Zhao Baochang. Calculation of the optical path difference and fringe location in polarization interference imaging spectrometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(6): 3877-3886. (in Chinese)
- [9] Wang Dong. Study of novel multispectral polarimetric imaging technique[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [10] Tian Erming, Zhang Jilong, Li Xiao, et al. Study on miniature static Fourier transform spectrometer used in laser warning receiver [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(3): 853-857. (in Chinese)
- [11] Pei Linlin, Xiangli Bin, Lv Qunbo, et al. Multi-slit polarization imaging spectrometer based on double amici prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1122001. (in Chinese)
- [12] Ma J L. Research on art appraisal based on hyperspectral imaging technology [J]. *Cultural Relics Protection and Archaeology*, 2017, 30(3): 15-19.
- [13] Muhammad J, Altun H, Abo-Serie E. Welding seam profiling techniques based on active vision sensing for intelligent robotic welding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(4): 127-145.
- [14] Gupta N, Suhre D R. Acousto-optic tunable filter imaging spectrometer with full Stokes polarimetric capability [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(14): 2632-2637.
- [15] Gu Mu, Ren Xifeng, Liao Sheng, et al. Infrared multi-spectral design based on point target feature parameter extraction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20190462. (in Chinese)
- [16] Yu Hui, Zhang Rui, Li Kewu, et al. Principles and simulation of pectropolarimetric imaging technique based on static dual intensity-modulated Fourier transform [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(5): 77-87. (in Chinese)