

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412986

空间调制型偏振成像的滤波器带宽优化方法研究*

董祉序, 杨 澍, 郭仁杰, 孙梦楠, 孙兴伟

(沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870)

摘要:针对空间调制型全偏振成像系统在不同目标场景下成像效果不稳定的问题,使其在多目标场景均能保持最佳性能,提出了一种基于仿真干涉水印条纹的滤波器带宽优化计算方法,实现了对系统成像透镜的选型理论指导。通过在强度图像上叠加不同稀疏程度仿真干涉水印条纹的二维正弦函数得到仿真干涉图像,应用快速傅里叶变换和频域低通滤波算法对仿真干涉图解调得到全偏振图像,再对与强度图像结构相似度最高的偏振图像进行求解。提出了基于改进粒子群优化算法的最优滤波器带宽计算方法,通过引入疫苗提取选择策略和模拟退火机制实现了最优滤波器带宽的自适应选取,再结合不同目标场景下选定的图像分辨率、入射光波长及 Savart 偏光镜单束光偏移量等系统参数,计算得到成像透镜最优焦距,从而完成理论选型。实验部分对比分析了基于最优滤波器带宽选型与传统的自行经验选型的空间调制型全偏振成像系统稳定性,实验结果表明,基于最优滤波器带宽搭建的空间调制型全偏振成像系统性能较好,所提出的基于最优滤波器带宽选型相比于自行经验选型的频谱图反演面积增大 4.16 倍、图像结构相似度提高了 63%,显著提高了系统的偏振成像质量。

关键词: 偏振成像; 空间调制; 仿真; 滤波器带宽

中图分类号: TH161

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

Optimization of optimal filter bandwidth for spatially modulated full polarization imaging

Dong Zhixu, Yang Shu, Guo Renjie, Sun Mengnan, Sun Xingwei

(School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: To address the issue of unstable imaging performance of spatially modulated fully polarized imaging systems in different target scenes, this paper proposes a method for optimizing filter bandwidth calculation based on simulated interference watermark fringes. This method aims to ensure that the system maintains optimal performance across various target scenarios and provides theoretical guidance for selecting system imaging lenses. The approach involves generating simulated interference images by superimposing two-dimensional sine functions of varying sparsity, which represent simulated interference watermark fringes, onto intensity images. The fast Fourier transform and the frequency domain low-pass filtering algorithm are used to demodulate the simulated interference diagram, producing the total polarization image. The polarization image with the highest structural similarity to the intensity image is selected for further analysis. Additionally, an optimal filter bandwidth calculation method based on improved particle swarm optimization algorithm is proposed. The adaptive selection of the optimal filter bandwidth is achieved by introducing a vaccine extraction selection strategy and a simulated annealing mechanism. Combined with the selected image resolution, incident light wavelength and Savart polarizer single beam light offset in different target scenes, the optimal focal length of the imaging lens was calculated, and the theoretical selection was completed. In the experimental section, the stability of the spatial modulation-based full-polarization imaging system, built using the optimal filter bandwidth selection, is compared with that of the traditional experience-based selection. The experimental results show that the spatial modulation total polarization imaging system based on the optimal filter bandwidth has better performance. The area of spectral graph

收稿日期: 2024-06-24 Received Date: 2024-06-24

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (52005347)、辽宁省“揭榜挂帅”科技重大专项项目 (2022JH1/10800049)、辽宁省教育厅基本科研项目 (LJKMZ2022045, JYTMS20231189)、兴辽英才计划项目 (XLYC2203190)、沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目 (RC220066)、辽宁省科技厅联合计划项目 (2023-BSBA-243) 资助

inversion is increased by 4.16 times and the similarity of the image structure based on the optimal filter bandwidth selection is improved by 63% compared with the self-empirical selection, which significantly improves the polarization imaging quality of the system.

Keywords: polarization imaging; spatial modulation; simulation; frequency domain filter bandwidth

0 引 言

在透明、高反光、低能见度等探测场景中,偏振成像设备比成像仪、光谱仪等光学传感器更符合探测需求。偏振成像技术能获取目标反射光的偏振信息,偏振特性与反射光强度、颜色信息完全不同,在复杂背景中凸显目标的能力更强。偏振成像技术已广泛应用于偏振去雾^[1-2],水下探测^[3],偏振检测^[4-5],惯性导航^[6-8],三维重构^[9-10],军事探测^[11-12]等领域。空间调制偏振成像技术不同于传统的分光成像思路,真正实现了一张照片调制出所有偏振图像。很多学者对其展开了理论、仿真、算法优化等研究。然而,上述研究的系统搭建一般是基于实验室现有元件,并未实现基于目标场景的最优系统搭建,这影响了偏振成像的质量。

分时偏振成像技术只适用于静态场景。实时偏振成像技术目前的4个方向分别是分振幅型、分孔径型、分焦面型、空间调制型。分振幅型偏振成像仪将景物辐射为4个振动方向不同的偏振光束,在4个探测器上形成4幅偏振图,该方法体积大、成本高。分孔径偏振成像利用子孔径成像的方式,在一个探测器的4个区域获得4幅偏振图像,分辨率较低。分焦面偏振成像在分孔径基础上利用四向微偏振芯片,实现了相邻4个像元的偏振方向均不相同,但加工精度要求较高。空间调制型偏振成像不同于上述方法,通过调制干涉条纹图,得到所需的各向偏振图,因高稳定性和原理简单获得广泛关注。2006年,Oka团队^[13-17]首次提出用两组 Savart 偏光镜(savart plate, SP)为核心的空间调制型测偏仪,利用干涉条纹获取目标偏振信息,改进了成像质量。Ai等^[18]指出,光源波长对图像信噪比有影响,当波长在500~600 nm时,图像信噪比最低。Cao团队^[19-22]提出了改进型 Savart 偏光镜,增加了频域反演面积,提高了成像质量,引发了大量学者关注,改进系统的准直透镜和成像透镜均直接选用100 mm规格,信噪比和分辨率未达到预期要求。胡巧云等^[23]对空间调制型偏振成像系统原理及仿真方法进行详细分析,指出影响成像质量的关键因素是滤波器带宽,调节成像透镜焦距可以调节滤波器带宽,但是仅进行了定性分析,没有对关键参数进行理论计算,无法对现实中系统搭建进行指导。Ye团队^[24-27]对滤光片带宽限制,偏光镜标定方法,解调算法等方面都进行了大量研究,为空间调制型全偏振成像系统的设计提供了参考依据,但其设计实验时,直接选用70 mm的成像透镜,并未得到最优滤波带

宽计算方法,成像效果较差。上述研究的系统搭建都是自行选型,没有选出最优的滤波器带宽,不能选出最优成像透镜焦距,图像高频信息损失较严重。

本文针对以上问题,提出了一种计算滤波器最优带宽的方法来指导成像系统的搭建。为了求解最优滤波带宽,对目标场景强度图像添加不同稀疏程度的仿真干涉条纹,再对仿真干涉图进行解调得到仿真偏振图像,利用改进的粒子群优化算法计算出成像质量最高的仿真偏振图对应的滤波器带宽即为最优滤波带宽,从而得到最优滤波器带宽计算方法。结合目标场景计算成像透镜最优焦距,完成所有零部件选型。与经验选型所搭建的系统对比试验证明,利用最优滤波器带宽仿真计算方法选择成像透镜所搭建的系统成像效果较好。

1 基本原理

1.1 空间调制型偏振成像调制原理

空间调制型全偏振成像系统如图1所示,系统由滤光片、空间调制模块、检偏器(透过方向与y轴负方向成45°)与CCD相机组合而成。空间调制模块由两块 Savart 偏光镜与中间的半波片(half-wave plate, HWP(快轴与x轴正方向成22.5°))组成。SP由两块 Savart 单板胶合而成。自然光经过滤光片,透过特定窄波段的单色光,经过空间调制模块分裂成4束偏振光。4束偏振光经过检偏器后,振动方向一致,再经过成像透镜,发生干涉,最后在相机上汇聚成具有干涉条纹的目标像。

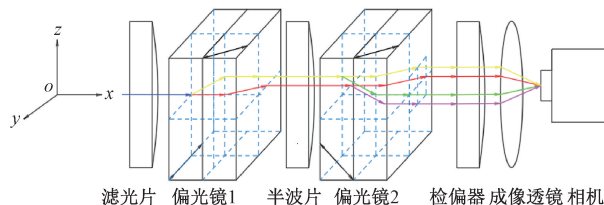


图1 基于空间调制的全偏振成像光学原理

Fig. 1 Optical schematic diagram of full polarization imaging based on spatial modulation

空间调制型全偏振成像系统中,4块 Savart 单板的光轴方向如图2所示。单色光经 SP1 左板发生双折射分成两束光。入射光与光轴所在的平面称为主平面,法线与光轴所在平面称为主截面。由于 SP1 左板的光轴处于入射面之中,则两束光的主平面重合,且都与主截面重合,为 xoz 平面。偏振方向垂直于主平面的光为寻常光

(o 光),传播方向不变。偏振方向平行于主平面的光为非寻常光(e 光),传播方向如图 2 所示,在 z 轴正方向的偏移量为 Δ :

$$\Delta = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} t \quad (1)$$

式中: n_o 、 n_e 分别是 o 光、 e 光折射率; t 为单个 Savart 板厚度。SP1 右板的光轴方向相对于 SP1 左板逆 yo 平面旋转了 90° 。在 SP1 右板中,两束光主平面为 xoy 平面。原来的 o 光振动方向平行于主平面,变成 e 光,在 y 轴负方向偏移量为 Δ 。原来的 e 光,振动方向垂直于主平面,变为 o 光,在 z 轴正方向的偏移量为 Δ 。

为了让两束偏振光继续分束,需要在两个 Savart 偏光镜间加入 HWP。HWP 快轴与水平面夹角为 22.5° 。在两束偏振光经过半波片后,它们的振动方向偏转了 45° ,两束偏振光进入 SP2 左板,各自发生双折射现象,分成 4 束偏振光,最后进入 SP2 右板,出射相对位置如图 2 所示。

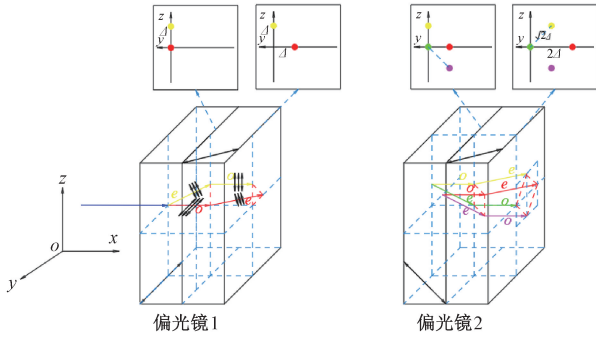


图 2 光线分束示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light beam splitting

检偏器使 4 束偏振光偏振方向一致,再使其经过成像透镜,在 CCD 上生成具有干涉条纹的目标像。干涉条纹中包含了全斯托克斯偏振信息。干涉图用 Stokes 矢量表示为:

$$I(x, y) = \frac{1}{2} S_0(x, y) + \frac{1}{2} S_1(x, y) \cos[2\pi\Omega(x + y)] + \frac{1}{4} \{ S_2 \cos[2\pi \times 2\Omega(x)] - S_2 \cos[2\pi \times 2\Omega(y)] \} + \frac{1}{4} \{ S_3 \sin[2\pi \times 2\Omega(y)] - S_2 \sin[2\pi \times 2\Omega(x)] \} \quad (2)$$

式中: $\Omega = \Delta/\lambda f$, Ω 为载波频率, λ 为入射光波长, f 为焦距。

1.2 解调原理

为解调干涉条纹中所有的偏振信息,需将得到的干涉目标像进行离散傅里叶变换,得到的频谱图如图 3 所示。

根据欧拉公式 $\cos t = (\exp(it) + \exp(-it))/2$, $\sin t = (\exp(it) - \exp(-it))/2$, 式(2)可改写为:

$$I(x, y) = \frac{1}{2} S_0(x, y) + \frac{1}{4} S_1(x, y) \{ \exp[i2\pi\Omega(x + y)] + \exp[-i2\pi\Omega(x + y)] \} + \frac{1}{8} [\bar{S}_{23}(x, y) \exp(i4\pi\Omega x) + S_{23}(x, y) \exp(-i4\pi\Omega x)] - \frac{1}{8} [\bar{S}_{23}(x, y) \exp(-i4\pi\Omega y) + S_{23}(x, y) \exp(i4\pi\Omega y)] \quad (3)$$

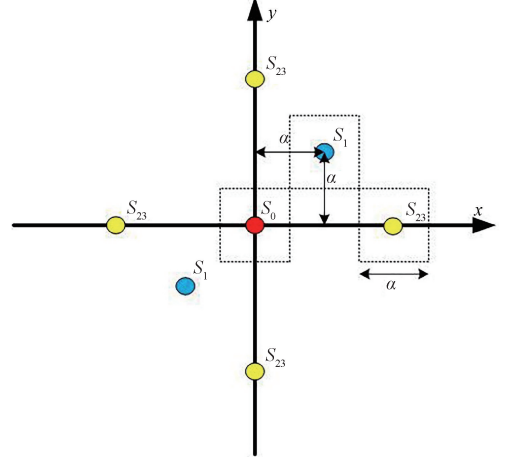


图 3 Stokes 参量频域分布

Fig. 3 Frequency domain distribution of Stokes parameters

对式(3)进行离散傅里叶变换得:

$$F[I(x, y)] = \frac{1}{2} F_0(u, v) + \frac{1}{4} [F_1(u - \alpha, v - \alpha) + F_1(u + \alpha, v + \alpha)] + \frac{1}{8} [\bar{F}_{23}(u - 2\alpha, v) + F_{23}(u + 2\alpha, v)] - \frac{1}{8} [\bar{F}_{23}(u, v + 2\alpha) + F_{23}(u, v - 2\alpha)] \quad (4)$$

式中: F_0 、 F_1 、 F_{23} 、 $\bar{F}_{23}$ 分别为 S_0 、 S_1 、 S_{23} 、 S_{23}^* 的傅里叶变换。

频谱图中的 7 个波峰分别包含了 S_0 到 S_3 的偏振信息。利用频域低通滤波算法对部分波峰进行滤波。为避免频谱混叠,滤波器带宽等于 S_1 偏移量,大小为 α , α 可表示为:

$$\alpha = \Omega \cdot D \cdot N \quad (5)$$

式中: D 为成像面像素尺寸; N 为成像面行(列)像素数。将滤波得到的单个波峰频谱图进行傅里叶逆变换即可得到对应的偏振图像。根据式(6)~(9),反演出 $S_0 \sim S_3$ 的偏振图像。

$$F[S_0(x, y)] = F_0(u, v) \leftrightarrow S_0(x, y) = F^{-1}[F_0(u, v)] \quad (6)$$

$$F\{S_1(x, y) \exp[i2\pi\Omega(x + y)]\} = F_1(u - \alpha, v - \alpha) \leftrightarrow S_1(x, y) = F^{-1}[F_1(u - \alpha, v - \alpha) \exp[-i2\pi\Omega(x + y)]] \quad (7)$$

$$F[S_{23}(x, y) \exp(-i4\pi\Omega x)] = F_{23}(u + 2\alpha, v) \leftrightarrow S_{23}(x, y) = F^{-1}[F_{23}(u + 2\alpha, v) \exp(i4\pi\Omega x)] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} S_2(x, y) &= \text{Re}[S_{23}(x, y)] \\ S_3(x, y) &= \text{Im}[S_{23}(x, y)] \end{aligned} \quad (9)$$

2 仿真优化

2.1 干涉条纹仿真方法

仿真图的设计参数如下:入射光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 频带宽度为 6 nm , $n_o = 1.67966$, $n_e = 1.49617$, 图像分辨率为 $523 \times 523 \text{ pixels}$, 像元大小为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ 。在原始图像上添加仿真干涉条纹, 仿真条纹表示为:

$$\text{embedImg} = \sin[\omega(ax + by)] \quad (10)$$

其中, $a = \sin\theta$, $b = \cos\theta$, θ 为干涉条纹与水平轴的夹角, ω 为频率因子决定每对干涉条纹所占像素数。当 $\theta = 90^\circ$ 时, 垂直于条纹方向每对干涉条纹所占像素数

为 $2\pi/\omega$, 此时系统载波频率为 $\Omega = \omega/2\pi \cdot D$, 频域滤波器带宽为 $\alpha = \Omega \cdot D \cdot N = \omega N/2\pi$; 当 $\theta = 45^\circ$ 或 $\theta = 135^\circ$ 时, 垂直于条纹方向每对干涉条纹所占像素数也为 $2\pi/\omega$, 水平方向每对干涉条纹所占像素数为 $2\sqrt{2}\pi/\omega$, 此时系统载波频率为 $\Omega = \omega/2\sqrt{2}\pi \cdot D$, 频域滤波器带宽为 $\alpha = \Omega \cdot D \cdot N = \omega N/2\sqrt{2}\pi$ 。由上述公式得频域图滤波器带宽 α 在数量上等于干涉图的干涉条纹数目。选定原始图像后, 图像行(列)像素数 N 为定值, 调节 ω 即可调节仿真干涉图的频域滤波器带宽 α 。

图 4(a) 所示为利用上述原理生成的仿真干涉图, 其中模拟了 90° 和 135° 两个方向的干涉条纹。 135° 条纹反演出 S_1 , 90° 的干涉条纹反演 S_2 和 S_3 。图 4(b)~(e) 所示为反演的 Stokes 目标图像。

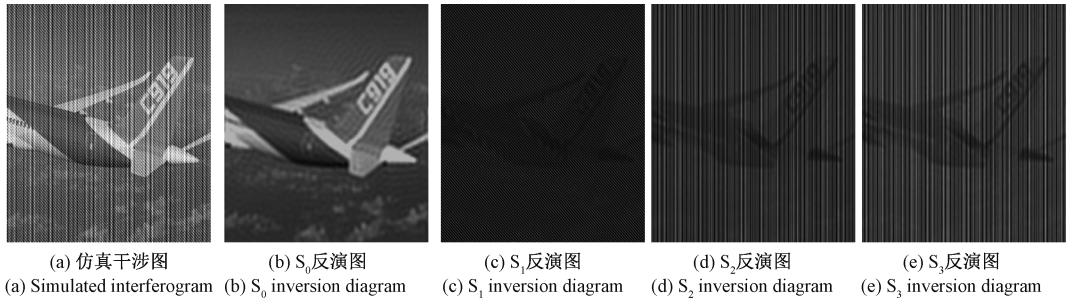


图 4 仿真干涉条纹解调结果

Fig. 4 Demodulation results of simulated interference fringes

频域滤波器带宽 α 的选择受到载波频率 Ω 的限制。由采样定理可知, 为完整的恢复一副图像, 采样频率应大于图像最高频率的 2 倍, 如图 5 所示, S_0 的采样频率至少为 S_0 最高频率的 2 倍。

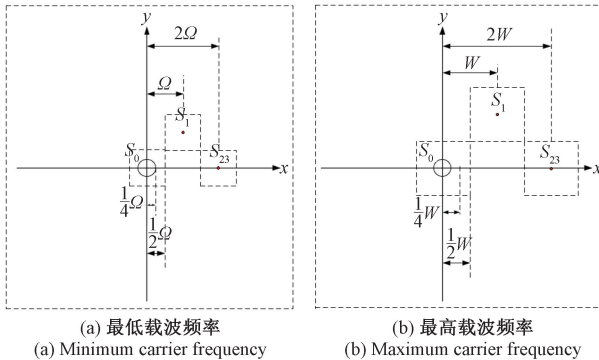


图 5 载波频率

Fig. 5 Carrier frequency plot

而在干涉图中, 反演 S_1 时, 为保证频谱不发生混叠, 采样频率至少为 S_0 最高频率的 4 倍。由图 5(a) 可知, 反演 S_1 的载波频率 Ω 至少为 S_0 最高频率的 4 倍。同理, 反演 S_2 和 S_3 时的采样频率至少为 S_0 最高频率的 8 倍。反演

S_2 和 S_3 的载波频率 2Ω 至少为 S_0 最高频率的 8 倍。当 α 值固定时, 90° 条纹与 135° 条纹所占像素值相同。采样频率不能过高, 由图 5(b) 可知, 为反演 S_2 和 S_3 , S_0 的采样频率最高为图像最高频率的 0.2 倍。频域滤波器带宽及其范围为:

$$\alpha = \Omega \cdot D \cdot N, 4\Omega_0 \cdot D \cdot N \leq \alpha \leq \frac{N}{5} \quad (11)$$

式中: Ω_0 为 S_0 的最高频率。

为获取全偏振信息, S_2 和 S_3 采样频率至少为 S_0 最高频率 8 倍。因此, 空间调制型偏振成像不适用于图像频率过高场景。不同频率原图与其对应的频谱图如图 6 所示。通过图 6(b) 可以看出, 图 6(a) 频率较高, 利用干涉条纹在频域图中分离偏振分量时, 易发生频谱混叠。通过图 6(d) 可以看出, 图 6(c) 频率较低, 适合利用干涉条纹从频域图获取偏振分量。

在图 6(c) 上添加仿真干涉条纹, 令频域滤波器带宽符合式(11)。在 135° 干涉条纹仿真实验中, 载波频率 Ω 刚好为 S_0 最高频率的 4 倍, 每对仿真干涉条纹刚好占据 8 个像素值时, $\omega = \pi/2\sqrt{2}$, $\alpha = N/8$, 在干涉图中, $\alpha = 523/8 = 65.375 \text{ pixel}$ 。利用仿真干涉实验, 研究当每对干涉条纹所占像素数 > 8 即 $\alpha < N/8$ 时, 或者每对干涉条纹所占像素数 < 8 即 $\alpha > N/8$ 时, 反演图成像质量变化情况。

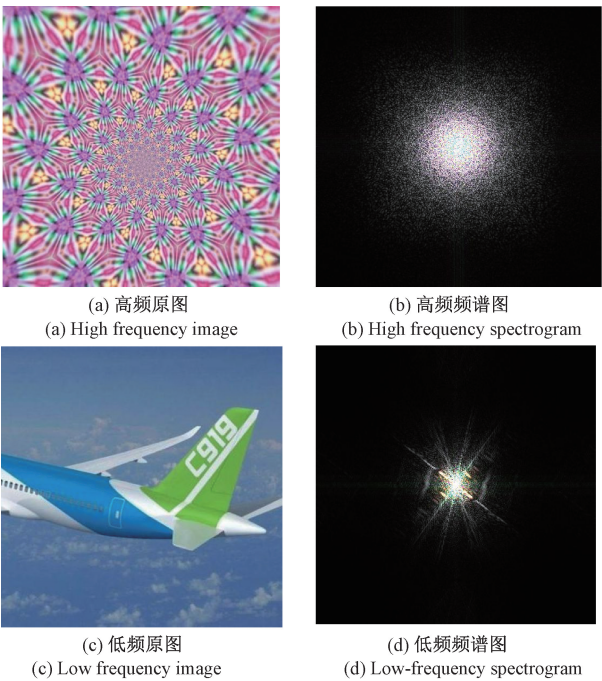


图 6 不同频率原图与对应频谱图

Fig. 6 Different frequency images and spectrograms

由于在每对干涉条纹所占像素数 >8 的情况下采样频率小于图像最高频率的 2 倍,不符合采样定理,但在实际应用中也会有此种情况发生,故每对干涉条纹所占像素数 >8 的情况也设计一组仿真实验,作为对照组。

结合采样定理和干涉图中偏振信息的频域分布规律可知, ω 与 α 之间的对应关系如表 1 所示。

表 1 ω 与 α 之间的对应关系	
Table 1 The correspondence between ω and α	
频率因子	频域滤波器带宽
$\sqrt{2}\pi/3$	$N/6$
$2\sqrt{2}\pi/7$	$N/7$
$\sqrt{2}\pi/4$	$N/8$
$2\sqrt{2}\pi/9$	$N/9$
$\sqrt{2}\pi/5$	$N/10$

在本文图像分辨率为 523×523 pixels,将 $N=523$ 代入 $N/6$ 、 $N/7$ 、 $N/8$ 、 $N/9$ 、 $N/10$ 可得仿真干涉图中 α 分别为 87.167、74.714、65.375、58.111、52.3 pixel。图 7(a)~(e) 所示分别为 α 为 87.167、74.714、65.375、58.111、

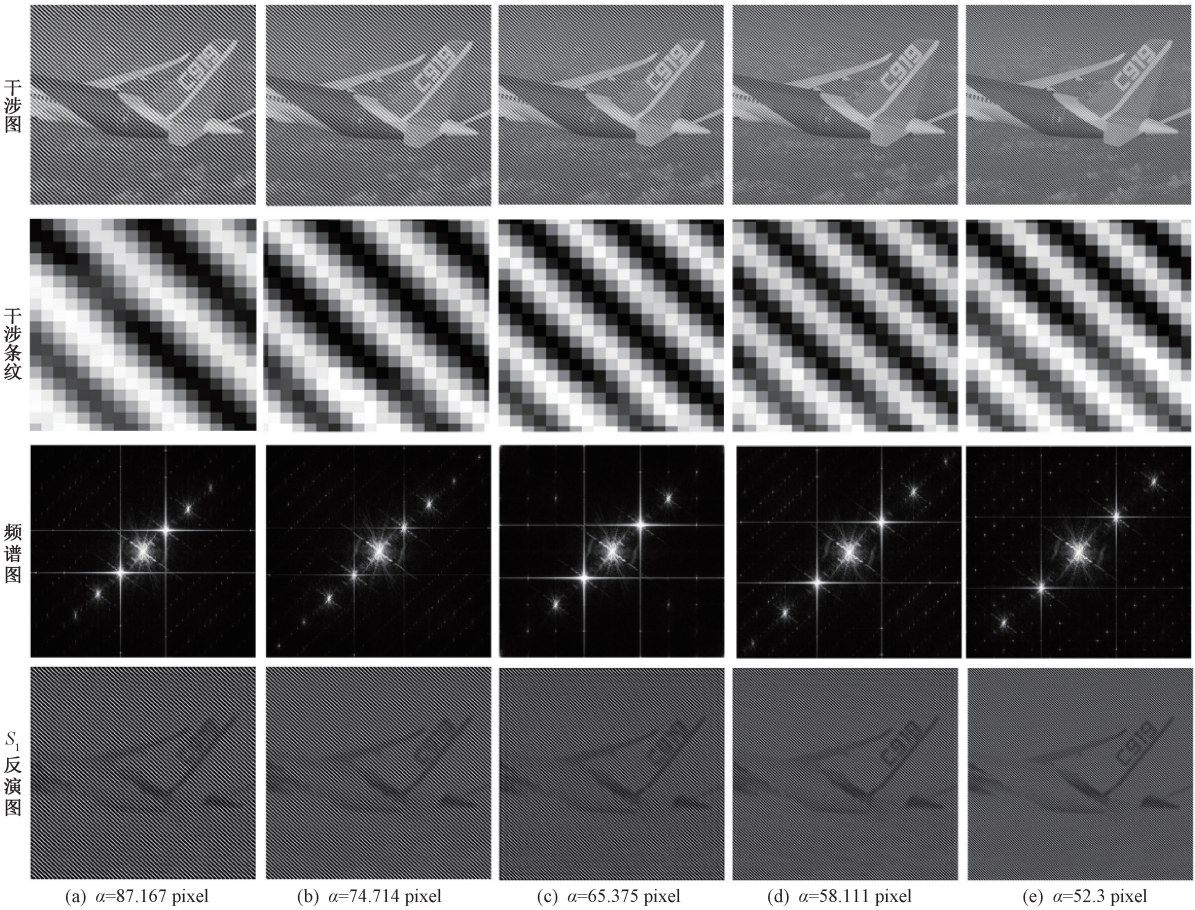


图 7 135° 仿真条纹解调结果

Fig. 7 135° simulated fringe demodulation results

52.3 pixel 时, S_1 的反演过程。从频谱图可以看出,波峰偏移量增大,滤波器带宽随之增大,用来反演 S_1 的数据面积随之增大。从反演图可以看出,图像随 α 增大高频信息越来越多,越来越清晰。

图 8(a)~(e) 所示分别为 α 为 $N/6$ 、 $N/7$ 、 $N/8$ 、 $N/9$ 、

$N/10$ 时, S_2 的反演过程。随着滤波器带宽 α 的增加,滤波器反演面积增加。当 $\alpha = N/6$ 、 $N/7$ 、 $N/8$ 、 $N/9$ 、 $N/10$ 时,干涉条纹所占像素值分别为 6、7、8、9、10。可以直观的观察,通过调节仿真干涉条纹数量,进而改变滤波器带宽, S_2 偏振反演图和 S_3 偏振反演图的成像质量也会随之改变。

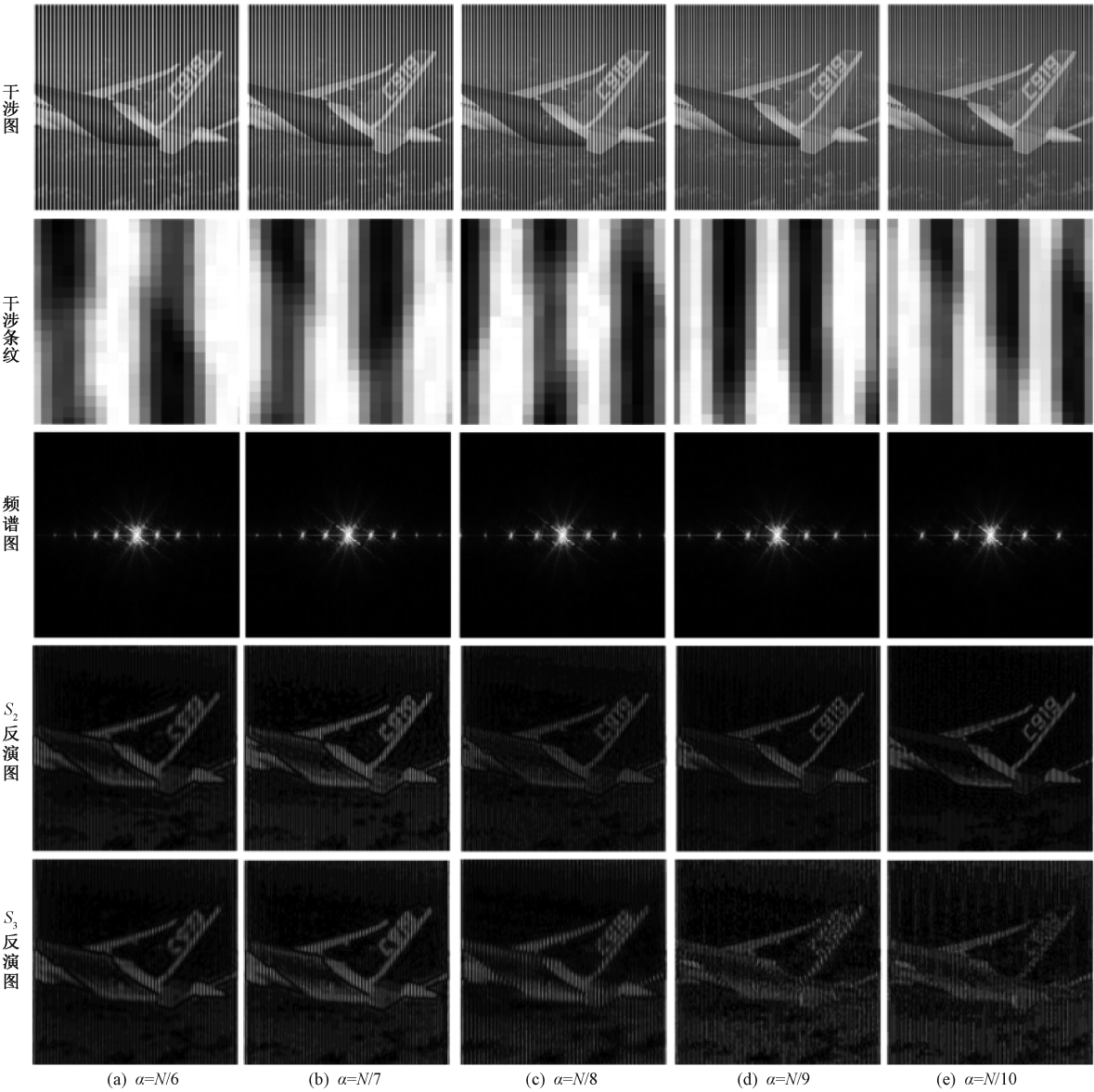


图 8 90° 仿真条纹解调结果
Fig. 8 90° simulated fringe demodulation results

利用反演图与干涉模拟图的欧氏距离相似度来定量评价反演质量。

欧氏距离相似度是计算两张图片相似度的一种常规方法。欧氏距离越小,表示两张图像相似度越大。欧氏距离越大,表示两张图像相似度越小。欧氏距离相似度公式如下:

$$d(x,y)=\sqrt{(\sum (x_i-y_i)^2)} \tag{12}$$

将欧氏距离相似度规约转换到(0,1],公式如下:

$$sim(x,y)=\frac{1}{1+d(x,y)} \tag{13}$$

分别对比当 α 为 $N/6$ 、 $N/7$ 、 $N/8$ 、 $N/9$ 、 $N/10$ 时, S_1 偏振反演图, S_2 偏振反演图, S_3 偏振反演图像与对应干涉模拟图的欧氏距离相似度。

表 2 为各反演图与对应干涉模拟图欧氏距离相似度。由表 2 可以看出,随着 α 减小,欧氏距离相似度逐渐减小,图像质量稳定上升。当 $\alpha = N/8$ 时, S_1 与原图欧氏距离相似度低至 0.082 9, S_2 反演图与原图欧氏距离相似度低至 0.222 6。

本文提出的干涉条纹仿真方法虽能调节图像频域滤波器带宽,并通过欧氏距离相似度来评价仿真反演图质量,但由于无法计算最优滤波器带宽,导致反演图质量欠佳。

表 2 各反演图与对应干涉模拟图欧氏距离相似度

Table 2 The Euclidean distance between each inversion image and the corresponding interference simulation image

结构 相似度	滤波器带宽				
	N/6	N/7	N/8	N/9	N/10
S_1	0.101 2	0.096 8	0.082 9	0.083 1	0.078 1
S_2	0.259 2	0.255 3	0.222 6	0.212 3	0.209 1
S_3	0.382 6	0.360 3	0.320 8	0.242 5	0.230 9

2.2 基于改进粒子群算法的滤波器带宽优化计算方法

为了提升反演偏振图质量,本节提出一种基于改进粒子群算法的滤波器带宽优化计算方法。粒子群优化算法采用向量编码粒子状态及属性,位置 p 表示各维度特征,速度 v 表示位置在每次迭代中变化量,对位置和速度进行迭代,可得最优解。

$$\begin{aligned} p_{i_d}(t+1) &= p_{i_d}(t) + v_{i_d}(t+1) \\ v_{i_d}(t+1) &= sv_{i_d}(t) + c_1 r_1(t) [I_d(t) - p_{i_d}(t)] + \\ & c_2 r_2(t) [G_d(t) - p_{i_d}(t)] \end{aligned} \quad (14)$$

式中: d 为粒子属性维度; t 为当前迭代次数; $v_{i_d}(t)$ 为 d 维上控制粒子 i 在第 t 次迭代时速度; c_1 和 c_2 分别为社会学习因子和个体学习因子; s 为惯性权重; $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 为区间 $(0,1)$ 内随机数; $I_d(t)$ 为粒子 i 具备最佳适应度的位置; $G_d(t)$ 为种群中所有粒子具备的最佳适应度位置。

由于各偏振反演图像的细节特征相似,早熟现象极易发生。为避免上述情况,需改进传统算法以增强局部搜索能力。针对粒子种群趋同性,提出疫苗提取和免疫选择策略相结合方法,根据当前种群内适应度值较高粒子中心位置和最大半径确定疫苗,解决局部极值问题。疫苗向量第 d 维分量为:

$$h_d = \max \{ |p_{1_d} - e_d|, |p_{2_d} - e_d|, \dots, |p_{n_d} - e_d| \} \quad (15)$$

式中: e 为适应度较优粒子的平均位置。根据粒子适应度和多样性的评价函数来控制粒子疫苗接种操作,评价函数为:

$$P(p_i) = \alpha \frac{\sum_{j=1}^n |f(p_i) - f(p_j)|}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |f(p_i) - f(p_j)|} + \beta \frac{f(p_i)}{\sum_{i=1}^n f(p_i)} \quad (16)$$

式中: α 和 β 为区间 $(0,1)$ 内随机数,前部分为粒子浓度评价,后部分为粒子适应度评价。分析可得,浓度低且适应度高或浓度高且适应度低粒子接种疫苗概率较小;而浓度高且适应度高粒子,即大量聚集于局部极值位置的粒子接种疫苗概率较大。

再引入模拟退火机制判断粒子早熟程度,并应用上述免疫扰动使其跳出局部极值点,将调控温度设为 t 次迭代时最差和最佳粒子适应度之差,结合概率突跳特性,对目标函数进行全局寻优。粒子前后位置适应度的变化量为:

$$\Delta = \frac{f_i(t+1) - f_i(t)}{f_{\text{worst}} - f_{\text{best}}} \quad (17)$$

接受概率为:

$$P = \begin{cases} 1, & \Delta \leq 0 \\ e^{-\Delta}, & \Delta < 0 \end{cases} \quad (18)$$

分析可得,当 $P > \text{random}[0,1]$ 时,粒子接受更新;当 $P < \text{random}[0,1]$ 时,粒子拒绝更新;通过退火策略使算法在粒子变化时既接受好解,又以一定概率接受差解,避免陷入局部最优。

改进粒子群优化算法以反演图与仿真偏振图的相似度为输入,以 α 最优解为输出,把式(11)作为目标函数,自适应获取滤波器带宽,具体流程如下。

- 1) 设置初始参数。
- 2) 产生初始种群。
- 3) 计算个体和全局最优解。
- 4) 采用式(14)计算粒子位置。
- 5) 采用式(18)判断是否更新粒子位置。
- 6) 采用式(16)选择粒子并对其进行免疫扰动。
- 7) 采用式(13)计算粒子适应度,并与上次迭代的个体和全局最优解对比,判断是否更新。
- 8) 重复步骤 3)~7),若达到预设值终止迭代。

改进粒子群优化算法通过引入免疫扰动和退火策略保证了算法的几乎处处强收敛性,显著提升局部优化精度和效率,可实现滤波器带宽自适应选取。

将图 6(c),作为目标场景,在图 6(c)上添加仿真干涉条纹,再利用改进粒子群优化算法,迭代次数设为 50,得到其最优滤波器带宽为 65。从图 6(d)可以看出,频域图中最高频率位置离频域图中心点约 16 个像素。结合其最优滤波器带宽为 65,得出图 6(c)的最优滤波器带宽约为图 6(d)中最高频率位置和图片中心点的距离的 4 倍。

综上所述,最优滤波器带宽获取方法为利用普通相

机拍摄目标场景,对强度图像傅里叶变换得到其频谱图,将强度图像最高频率 Ω_0 的4倍设置为偏振载波频率,再利用2.2节提出的改进粒子群优化算法计算最优滤波器带宽。

3 实验验证

空间调制型偏振成像系统实验原理如图9所示,本文搭建的空间调制偏振成像系统如图10所示。装置最前方加一准直透镜,焦距为300 mm,滤光片中心波长为532 nm,半带宽为10 nm,偏光镜尺寸为10 mm×10 mm×12 mm(单板厚度为6 mm),检偏器偏振方向为45°,探测器分辨率为2 448×2 048 pixels,像元尺寸为3.45 μm×3.45 μm。

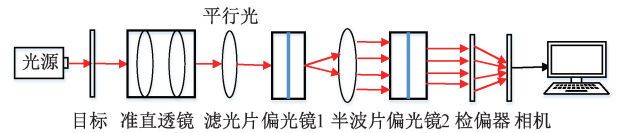


图9 实验原理

Fig. 9 Schematic diagram of the experiment

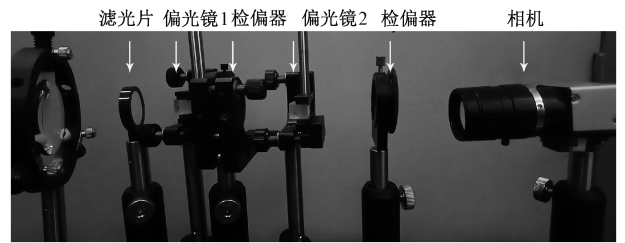


图10 空间调制型全偏振成像装置

Fig. 10 Spatially modulated full polarization imaging device

目标图像由实验中相机所得的图像裁剪而成,分辨率为1 100×600 pixels。根据第2.2节提出的优化计算方法,得出目标场景图竖直方向的最优滤波器带宽为55。选定滤波器带宽后,可以调整偏光镜厚度,入射光波长,成像透镜焦距等3个参数来实现最优滤波器带宽。考虑经济性和便利性选择固定相机、滤光片、偏光镜,只调整成像透镜焦距来实现滤波器带宽为最优滤波器带宽。根据最优带宽计算最优相机焦距为48.8 mm。定制49 mm镜头进行实验可得到较好的图像。

Cao团队^[19-22]的采用100 mm成像透镜,是利用其实验室现有元件组合成像系统,并未设计计算;Zhang等^[24-27]先后试用过165和70 mm的成像透镜,均是按经验设定载波频率的值计算出的成像透镜焦距,并未对滤波器带宽最优值进行研究。本文选择49 mm镜头和之前研究者常用的100 mm镜头分别进行偏振成像实验。49 mm焦

距镜头为针对本实验场景,利用本文提出的基于改进粒子群算法的滤波器带宽优化计算方法得出。100 mm焦距镜头在以往研究中较为普遍,作为对照组。

图11所示为用 $f=49$ mm和 $f=100$ mm的镜头实验得到的干涉目标像,频谱图和反演图。两张干涉目标像上都有清晰的干涉条纹。利用傅里叶变换和频域低通滤波算法从干涉条纹中反演出偏振信息。图11(a1)和(a2)分辨率相同,图11(a1)的成像面积较大,即相同成像条件下可以拍摄更大的物体,缺点是亮度较低。从图11(b1)和(b2)可以看出,当 $f=49$ mm时,波峰偏移量较大,偏振信息在频域较好的分离出来,滤波器带宽 α 随之增大。图11(b2)中波峰偏移太小,在滤波时容易发生频谱混叠。由图11(c1)看出,图片反演质量比图11(c2)好,能较好保持边缘特征且噪点较少。

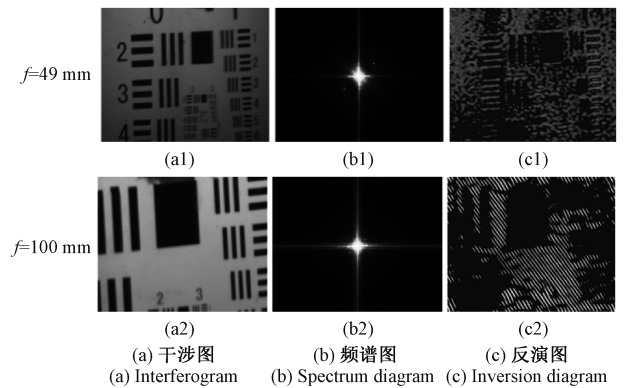


图11 空间调制型全偏振成像实验结果

Fig. 11 Experimental results of all polarization imaging experiment of spatial modulation

定量对比分析 $f=49$ mm和 $f=100$ mm的成像质量如表3所示。 $f=49$ mm时,成像面积增大了4.16倍,滤波器带宽 α 增大2.04倍,同时,图像反演质量也较好。然后利用结构相似度从亮度、对比度和结构3个方面,对解调结果与仿真之间的相似程度进行分析。图11(c1)与(a1)结构相似度为62%,图11(c2)与(a2)结构相似度为38%。结构相似度62%比38%多了63%,即与 $f=100$ mm时的反演图相比, $f=49$ mm时的反演图相似度增加了63%。实验结果表明,本文提出的最优滤波器带

表3 不同焦距成像透镜成像效果
Table 3 Imaging effects of different focal lenses

焦距/mm	图像面积 /mm ²	滤波器带 宽/pixel	反演面积 /pixel ²	结构 相似度
49	269	55	3 025	0.62
100	66	27	729	0.38

宽计算方法能有效提高成像系统的成像质量,满足优化成像系统搭建的需求。即利用最优滤波器带宽 α ,再结合目标场景强度图最高频率,搭建的偏振成像系统成像质量较高。

4 结 论

本文提出了一种基于仿真干涉条纹计算空间调制偏振成像系统最优滤波器带宽的方法来指导成像系统搭建。为了增强空间调制型偏振成像质量,提出了最优滤波器带宽的仿真计算方法,从而指导了偏振成像系统的选型搭建,使得频谱图反演面积更大,偏振图像细节保持能力更强。仿真和实验结果表明,针对仿真原始图像的最优滤波器带宽为65;针对实验场景的最优滤波带宽为55。使用本文滤波器最优带宽仿真计算方法所搭建的系统进行实验,搭建系统验证得出频谱图反演面积比对照组增大4.16倍,反演图与干涉图结构相似度比基于经验搭建的对照组系统提高了63%,显著提升了偏振成像质量。

参考文献

- [1] 高超,周维虎,高书苑,等.基于改进MLS算法的偏振调制激光测距方法实现[J].中国激光,2023,50(14):101-109.
GAO CH, ZHOU W H, GAO SH Y, et al. Implementation of polarization modulation laser ranging method based on improved moving least square algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(14): 101-109.
- [2] 霍永胜.基于偏振的暗通道先验去雾[J].物理学报,2022,71(14):118-126.
HUO Y SH. Polarization-based research on a priori defogging of dark channel[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(14): 118-126.
- [3] 陈哲,周旭,沈洁,等.基于梯度先验的水下图像恢复[J].仪器仪表学报,2022,43(8):39-46.
CHEN ZH, ZHOU X, SHEN J, et al. Underwater image restoration based on gradient prior[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 39-46.
- [4] 韩浩,何赞泽,杜旭,等.基于偏振信息图像增强的多目标检测[J].电子测量与仪器学报,2023,37(3):29-38.
HAN H, HE Y Z, DU X, et al. Multi-object detection based on polarization information image enhancement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 29-38.
- [5] 邱海超,刘安,唐朝清.基于正弦结构光激励的透明材质缺陷检测方法[J].仪器仪表学报,2023,44(8):173-180.
QIU H CH, LIU AN, TANG CH Q. Automatic defects detection method for transparent materials based on sinusoidal structured light[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 173-180.
- [6] 胡浩,郜鹏.一种大视野超分辨结构光照明显微成像方法[J].仪器仪表学报,2023,44(5):177-183.
HU H, GAO P. Large-field super-resolution microscopic imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 177-183.
- [7] 吕鑫,王道档,阮旸,等.用于瞬态微观轮廓检测的Mirau偏振干涉显微镜[J].仪器仪表学报,2022,43(2):92-99.
LYU X, WANG D D, RUAN Y, et al. Polarization Mirau interference microscope for transient microscopic testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 92-99.
- [8] 陈广秋,尹文卿,温奇璋,等.基于双重注意力机制生成对抗网络的偏振图像融合[J].电子测量与仪器学报,2024,38(4):140-150.
CHEN G Q, YIN W Q, WEN Q ZH, et al. Polarization image fusion based on dual attention mechanism for generating adversarial networks[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(4): 140-150.
- [9] 鲍昌皓,高欣健,王文莉,等.结合高频感知的大气偏振模式生成方法[J].电子测量与仪器学报,2024,38(4):18-26.
BAO CH H, GAO X J, WANG W L, et al. Atmospheric polarization mode generation method based on high-frequency perception[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(4): 18-26.
- [10] 罗海波,曹军峰,盖兴琴,等.基于偏振成像的工业视觉及其关键技术[J].激光与光电子学进展,2022,59(14):44-52.
LUO H B, CAO J F, GAI X Q, et al. Industrial vision based on polarization imaging and its key technologies[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(14): 44-52.
- [11] 于天燕,秦杨,蒋林,等.低偏振超宽光谱分色膜设

- 计与制备[J]. 红外与毫米波学报, 2024, 43 (3): 408-414.
- YU T Y, QIN Y, JIANG L, et al. Design and fabrication of an ultra-broadband dichroic beamsplitter with low polarization [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2024, 43 (3): 408-414.
- [12] 惠战强, 高黎明, 刘瑞华, 等. 低损耗大带宽双芯负曲率太赫兹光纤偏振分束器[J]. 物理学报, 2022, 71(4): 048702.
- HUI ZH Q, GAO L M, LIU R H, et al. Dual-core negative curvature fiber-based terahertz polarization beam splitter with ultra-low loss and wide bandwidth[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(4): 048702.
- [13] OKA K, SAITO N. Snapshot complete imaging polarimeter using Savart plates [C]. Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VIII. SPIE, 2006, 6295: 43-49.
- [14] LUO H T, OKA K, DEHOOG E, et al. Compact and miniature snapshot imaging polarimeter [J]. Applied Optics, 2008, 47(24): 4413-4417.
- [15] DEHOOG E, LUO H T, OKA K, et al. Snapshot polarimeter fundus camera[J]. Applied Optics, 2009, 48(9): 1663-1667.
- [16] OKA K, HAGA Y, KOMAKI Y. Spectroscopic full polarimeters using spatial carriers [C]. Polarization Science and Remote Sensing VI. SPIE, 2013, 8873: 215-222.
- [17] OKA K, HAGA Y, MICHIDA H. Snapshot Mueller-matrix spectropolarimeter using spectral and spatial carriers[C]. Polarization Science and Remote Sensing VII. SPIE, 2015, 9613: 99-107.
- [18] AI J J, GAO P, CHEN Q Y, et al. Image quality and spectral performance evaluations of a polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope[J]. Applied Optics, 2017, 56(21): 5933-5938.
- [19] CAO Q ZH, ZHANG CH M, DEHOOG E. Snapshot imaging polarimeter using modified Savart polariscopes[J]. Applied Optics, 2012, 51(24): 5791-5796.
- [20] CAO Q ZH, ZHANG J, DEHOOG E, et al. Demonstration of snapshot imaging polarimeter using modified Savart polariscopes[J]. Applied Optics, 2016, 55(5): 954-959.
- [21] 曹奇志, 唐金凤, 潘杨柳, 等. 线性剪切空间调制快拍成像动态定标技术[J]. 物理学报, 2022, 71(15): 150-156.
- CAO Q ZH, TANG J F, PAN Y L, et al. Dynamic calibration of linear shear spatial modulation snapshot imaging polarimeter [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(15): 150-156.
- [22] 贾辰凌, 潘安, 张晶, 等. 线性剪切空间调制快拍成像偏振仪动态定标数据处理技术[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2024, 47 (2): 37-43.
- JIA CH L, PAN AN, ZHANG J, et al. Data processing of dynamic calibration of linear shear spatial modulation snapshot imaging polarimeter[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 47 (2): 37-43.
- [23] 胡巧云, 杨伟锋, 胡亚东, 等. 空间调制型全 Stokes 参量偏振成像系统原理及仿真[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 152-158.
- HU Q Y, YANG W F, HU Y D, et al. Principle and simulation of a spatially modulated full Stokes parameters polarization imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 152-158.
- [24] ZHANG Z Y, YE S, WANG S CH, et al. Research on the bandwidth limit of spatially modulated full polarization imaging based on frequency domain analysis[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107297.
- [25] 王新强, 胡峰, 熊伟, 等. 基于空间外差的拉曼信号处理方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42 (1): 93-98.
- WANG X Q, HU F, XIONG W, et al. Research on Raman signal processing method based on spatial heterodyne [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42 (1): 93-98.
- [26] ZHANG Z Y, YE S, LI SH, et al. Optimal demodulation algorithm of spatially modulated full-polarization imaging system [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2020, 86(12): 761-766.
- [27] 张紫杨, 叶松, 熊伟, 等. 基于空间调制偏振成像的 Savart 棱镜参数标定[J]. 光学学报, 2022, 42 (21): 2111001.
- ZHANG Z Y, YE S, XIONG W, et al. Parameter calibration of Savart prism based on spatially modulated polarization imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(21): 2111001.

作者简介



董祉序, 2011 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2017 年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为光学精密测量理论、数字/图像信号处理技术、基于多传感器融合与大数据的智能制造。

E-mail: dong_zhixu@126.com

Dong Zhixu received his B.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2011, and Ph.D. degree from Shenyang University of Technology in 2017. He is currently a professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include optical precision measurement theory, digital/image signal processing technology, intelligent manufacturing based on multi-sensor fusion and big data.



杨澍, 2018 年于沈阳工业大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学硕士研究生, 主要研究方向为数字/图像信号处理技术。

E-mail: yangshu@smail.sut.edu.cn

Yang Shu received his B.Sc. degree from

Shenyang University of Technology in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Shenyang University of Technology. His main research interests include digital/image signal processing technology.



孙梦楠(通信作者), 2011 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2014 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 2020 年于东北大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学讲师, 主要研究方向为数字/图像信号处理技术、非线性动力学。

E-mail: sunmengnan0204@163.com

Sun Mengnan (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2011, M.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2014, and Ph.D. degree from Northeastern University in 2020, respectively. Now she is a lecturer at Shenyang University of Technology. Her main research interests include digital/image signal processing technology and nonlinear dynamics.