

完美涡旋光散斑光场照明均匀性设计

杨如诗¹, 邹鸿玮¹, 刘或涵¹, 曹睿², 钟胜强¹, 曾楷彬¹,
吴稼驹¹, 杨黎^{2*}, 蒋先涛^{1*}

(1. 中山大学理学院, 广东深圳 518107;

2. 深圳职业技术大学集成电路学院, 广东深圳 518055)

摘要:与传统高斯散斑光场相比,完美涡旋光(Perfect Optical Vortex, POV)散斑在光场传输、散斑尺寸及光记忆效应等方面具有独特性能,但其环形光强会使散斑呈现“甜甜圈”结构,导致成像质量差、测量精度低以及数据分析困难。为此,设计了一种能够提高 POV 散斑照明均匀性的光学系统。以 POV 散斑场为光源,基于 ZEMAX 设计了一套高均匀性科勒照明系统,并通过降低评价函数对曲率半径、透镜间距等关键参数进行系统性优化。系统由三片式集光镜和双胶合聚光镜构成。其中,集光镜对冕牌玻璃 H-ZK9A 与火石玻璃 ZF2 进行对比优化,聚光镜使用 Thorlabs 成品透镜进行设计。仿真结果表明,在序列模式单波长条件下,系统照度均匀性均超过 96%,采用 ZF2 的方案可达 98.9%,在引入物理散射与相位调制的非序列模式下,系统均匀度均超过 90%;多波长条件下,无论是序列模式还是非序列模式,两个系统在可见光波段内均保持稳定的照明均匀性,证明了系统适用于宽谱照明场景。在微观统计特性方面,像面散斑对比度接近 1,且空间自相关的特征尺寸仿真值与理论值高度吻合。进一步实验表明,该系统能稳定生成 POV 动态散斑光场,实际获取的横纵剖面曲线、中心矩形区域照度均匀度超过 86%,验证了设计的可行性。实验数据略低于非序列模式仿真结果,主要归因于元件对准精度误差、SLM 零级光残余以及实验环境噪声等物理因素。本研究成功实现了 POV 散斑照明均匀化设计,在宏观上消除环形强度分布的同时,精确且无损地保留了其微观统计特征,为特殊结构光照明系统优化提供了一种可行思路,并为其在精密成像与信息处理等领域的应用奠定了基础。

关键词: 光学设计;科勒照明;完美涡旋光散斑;ZEMAX

中图分类号: O435.2;O435.1 **文献标识码:** A

Design of illumination uniformity for perfect optical vortex speckle fields

YANG Rushi¹, ZOU Hongwei¹, LIU Yuhan¹, CAO Rui², ZHONG Shengqiang¹, ZENG Kaibin¹,
WU Jiaju¹, YANG Li^{2*}, JIANG Xiantao^{1*}

(1. School of Science, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China;

2. School of Integrated Circuits, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China)

* Corresponding author, E-mail: yangli@szpu.edu.cn; jiangxt27@mail.sysu.edu.cn

Abstract: Compared with conventional Gaussian speckle fields, speckles generated by a perfect optical

收稿日期:2026-03-02;修订日期:2026-03-26.

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(No. 2024A1515011945);深圳市基础研究计划资助项目(No. JCYJ20210324094204012);中央高校基本科研业务费资助项目(No. 23qnp38)

vortex (POV) exhibit distinctive characteristics in light-field propagation, speckle size, and the optical memory effect. However, the annular intensity distribution produces a donut-shaped structure, leading to degraded imaging quality, reduced measurement accuracy, and increased difficulty in data analysis. To address this limitation, an optical system was designed to enhance the illumination uniformity of POV speckle fields. Using the POV speckle field as the light source, a highly uniform Köhler illumination system was designed in ZEMAX. Key parameters, including the radius of curvature and lens spacing, were systematically optimized by minimizing the merit function. The system consisted of a three-element collecting mirror and a cemented doublet condenser. The collecting mirror was comparatively optimized using crown glass H-ZK9A and flint glass ZF2, whereas the condenser was constructed with commercial Thorlabs lenses. Under single-wavelength conditions in sequential mode, the illumination uniformity of both systems exceeded 96%, with the ZF2-based design reaching 98.9%. In non-sequential mode, in which physical scattering and phase modulation were introduced, the system uniformity remained above 90%. Under multi-wavelength conditions, both systems maintained stable illumination uniformity across the visible spectrum in sequential and non-sequential modes, demonstrating their suitability for broadband illumination. In terms of microscopic statistical properties, the speckle contrast at the image plane approached 1, and the simulated characteristic size of the spatial autocorrelation showed strong agreement with the theoretical value. Further experiments demonstrated that a dynamic POV speckle field could be stably generated. The measured illumination uniformity obtained from the horizontal and vertical profiles, as well as from the central rectangular region, exceeded 86%, confirming the effectiveness and feasibility of the design. The experimental values were slightly lower than the simulation results, mainly owing to physical factors such as alignment errors, SLM zero-order light, and environmental noise. Uniform POV speckle illumination was successfully achieved in this study. The macroscopic annular intensity distribution was eliminated while the microscopic statistical properties were well preserved. This approach provides an effective strategy for optimizing specially structured light systems and offers potential applications in precision imaging and information processing.

Key words: optical design; Köhler illumination; perfect optical vortex speckle; ZEMAX

1 引言

激光散斑是指激光经过随机散射介质后,不同传播方向的散射光相互干涉所形成的具有明暗起伏的颗粒斑状结构,其尺寸 d 与光的波长 λ 、散射介质到探测面的距离 L 以及入射光斑的尺寸 S 有关,通常满足 $d \propto \frac{\lambda L}{S}$ ^[1]。激光散斑兼具低空间相干性与高时间相干性^[2],这一特性不仅有利于提升光学成像的空间相位灵敏度、空间分辨率和信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR),还有效抑制散斑噪声等相干伪影^[3]。此外,散斑场还表现出独特的光学记忆效应,即当入射光的角度、位置或波前在一定范围内发生变化时,散斑图案会相应发生角向、平移或旋转相关的位置变化,但图案结构基本不会改变,即分别对应角向

光学记忆效应、平移光学记忆效应和旋转光学记忆效应^[4-5]。基于上述特性,激光散斑已广泛应用于非侵入式深层组织成像^[6]、脑血流监测(Laser Speckle Contrast Imaging, LSCI)^[7]、非视域成像(Non-Line-of-Sight, NLOS)^[8]、光学信息加密与神经形态通信^[9]及其他复杂环境^[10]中。

与传统高斯光产生的散斑场相比,POV光产生的散斑场在光场传输上表现出在傅里叶变换域内不受传播距离影响的特性^[11]。实验观测发现,随着拓扑电荷数的增加,散斑尺寸逐渐减小,进而提高了系统的分辨率^[3],并且在强散射下仍能保持散斑相关性与信息可重构性^[12],在光学成像^[3]、光通信^[13]等领域具有广阔的应用潜力。

然而,由于POV光固有的环形强度分布,其散斑光场呈现出“甜甜圈”状结构,这种由光源形状引入的照度不均匀性不仅会使测量结果受到

局部光强变化的干扰,产生系统性偏差,还会给后续的数据处理带来额外负担,影响分析结果的可靠性。因此,在保持涡旋光特性的同时实现高均匀照明,对于推动其在重要领域的应用具有关键意义。

旋转散射片^[14-15]、微透镜阵列(Microlens Array, MLA)^[16]等多种匀化技术已被用于提升照明均匀度。但旋转散射片主要利用时间平均效应抑制微观散斑颗粒感,在处理具有环形强度分布的 POV 光束时,难以从物理机制上消除其大尺度的径向几何不均。而 MLA 虽能通过子孔径分割实现匀化,但在短距离、大视场应用中常伴随明显的边缘照度衰减与畸变。此外,相干激光经 MLA 单元分割并重叠后,易在目标面产生周期性相干干涉条纹,且入射光束的发散角波动会显著恶化其照明平坦度^[17-19]。在常规的照明方式如临界照明中,光源面与目标照明面通常处于空间上的共轭或直接投影关系,这使得散斑随时间动态变化时,其宏观的环形不均匀几何结构会被直接映射到样品平面上。这种由光源本征模式引入的低频大尺度不均匀性,难以单纯依靠微透镜阵列的子孔径分割或散射片的时间平均效应从物理机制上彻底消除。相比之下,科勒照明(Köhler Illumination)^[20]在实现高均匀度、高能量利用率且无干涉条纹的平顶照明方面展现出更为显著的优势。

国内外研究人员对利用科勒照明原理实现高均匀度照明开展了大量卓有成效的研究。在显微成像与检测领域,朱晓萌等^[21]研制了基于改进型科勒照明的全场光学相干层析成像系统,有效提升了成像分辨率。隋成华等^[22]与王起等^[23]则分别将其应用于裂隙灯显微镜和紧凑型连续变倍显微系统中,均成功实现了 92% 以上的高均匀度照明。在复杂光场调控与光束整形方面, Li 等^[24]利用基于科勒原理的微透镜阵列,提出一种兼顾高效匀光与定制化光场分布的车灯预整形方法。Liu 等^[16]开发的新型积分匀光器,在复杂偏振光场中实现了超过 90% 的整体辐照均匀度。Ibrahim 等^[25]的定量表征研究更进一步证实,相较于其他典型折射式光束整形器,科勒积分器在照明均匀性与平坦度上表现最优。综上所述,科勒照明在常规光场匀化中已展现出卓越效能,然

而,利用该原理对具有特殊固有环形强度分布的 POV 散斑场进行针对性匀化设计的研究目前仍较为鲜见。

基于以上研究现状与应用需求,为解决 POV 散斑光场在照明过程中易产生环形不均匀的问题,本研究将科勒照明系统引入 POV 光场调控中。其核心理论在于利用透镜组改变光场的传播域,将宏观的空间强度缺陷转化为均匀的角谱分布。通过在 ZEMAX 平台上建立了完整的光路模型,降低评价函数以对集光镜与聚光镜的光焦度分配、材料选择、曲率半径及透镜间距等关键参数进行优化,并利用光线追迹与照度分布仿真对均匀性进行定量评估。最终通过构建实验系统,在 POV 动态散斑照明条件下对优化后的照明方案进行了验证。

2 设计思路及原理

极坐标 (r, θ) 下贝塞尔-高斯光束的复场为^[3]:

$$E_{BG}(r, \theta) = J_l(k_r r) \exp(i l \theta) \exp\left(-\frac{r^2}{v^2}\right), \quad (1)$$

其中: J_l 为第一类 l 阶贝塞尔函数, k_r 是贝塞尔-高斯光束的径向波矢量, $\exp\left(-\frac{r^2}{v^2}\right)$ 是束腰为 v 的高斯光束分量。将空间光调制器 SLM 置于傅里叶透镜的前焦面处,透镜就会对其输出的贝塞尔-高斯光束进行傅里叶变换,在透镜后焦面处形成强度分布呈环状且相位呈螺旋结构的完美涡旋光,其复场分布为:

$$E_{POV}(r, \theta) = i^{l-1} \frac{v}{v_0} \exp(i l \theta) \exp\left[-\frac{(r^2 - r_r^2)}{v_0^2}\right] I_l\left(\frac{2r_r r}{v_0^2}\right), \quad (2)$$

其中: $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \sqrt{k_r^2 + k_z^2}$, k_z 为纵向波矢, λ 为波长, $v_0 = \frac{2f}{h\nu}$ 是高斯光束在焦点处的束腰, I_l 为 l 阶第一类修正贝塞尔函数, r_r 为环形半径, l 为拓扑荷数。拓扑荷数 l 决定了涡旋光束的角向相位梯度及其对应的空间频率分布。随着 l 的增大,散射后散斑场中的有效空间频率范围拓展,散斑颗粒尺寸减小且角向相关性增强^[3],但过高的 l 会引入超出 SLM 采样能力的高频分量,导致模式

退化与能量损失。因此,在本研究中选取 $l=5$ 来产生完美涡旋光,其光强分布为:

$$I_{\text{POV}}(r, \theta) = |E_{\text{POV}}(r, \theta)|^2 = \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 \exp\left[-\frac{2(r^2 - r_r^2)}{v_0^2}\right] \left[I_l\left(\frac{2r_r r}{v_0^2}\right)\right]^2. \quad (3)$$

设经过散射片调制后的 POV 光源散斑复振幅为:

$$E_s(x_0, y_0) = E_{\text{POV}}(x_0, y_0) \exp[i\phi(x_0, y_0)], \quad (4)$$

其中: $\phi(x_0, y_0)$ 为随机散射相位。在科勒照明结构中,光源被集光镜成像于孔径光阑所在平面,而样本所在的照明面与孔径光阑处于严格的傅里叶变换关系,即物面上的光场分布 $E_{\text{obj}}(x, y)$ 在空域上不再是光源的直接成像,而是 POV 散斑场角谱的傅里叶变换:

$$E_{\text{obj}}(x, y) = \iint E_s(x_0, y_0) \exp[-i2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)] dx_0 dy_0, \quad (5)$$

其中: f_x 和 f_y 为与物面坐标相关的空间频率。由于动态散斑引入的相位是快速变化的随机变量,目标面上的系综平均光强由光源平面的互相关函数决定。在这一变换过程中,POV 光场在空域上的环形能量被物理性地打散,并均匀映射到了目标面的各个空间频域分量中。宏观的“甜甜圈”结构在频域转化为平缓的分布,从而从机制上抹平了径向的大尺度照度差异。进一步,位于傅里叶共轭面的孔径光阑相当于在角谱域引入低通滤波,使像面照明以直流分量为主,高频非均匀性被显著削弱,最终实现均匀且无结构纹理的照明效果。

基于上述物理机理,本研究设计的科勒照明原理及各元件位置如图 1 所示。其中, y_0, u_0 分别为涡旋光源半径及光源发出光线的孔径角, y', u' 分别为照明光斑在样本上的半径及物镜入瞳处

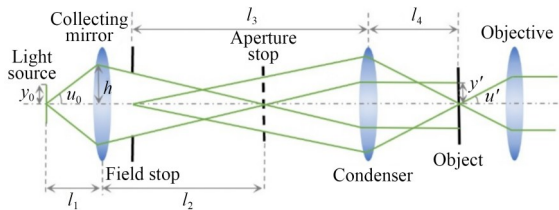


图 1 科勒照明原理示意图

Fig. 1 Köhler illumination principle schematic

光线的孔径角, l_1, l_2 分别为光源到集光镜和集光镜到孔径光阑的距离, l_3, l_4 分别为视场光阑到聚光镜和聚光镜到样品平面的距离。由光源任一点发出的光经过集光镜和视场光阑成像于孔径光阑所在的平面,即聚光镜的前焦平面。视场光阑紧贴于集光镜后,被聚光镜成像在样品所在平面上^[26]。观察时,不仅可以利用光源与孔径光阑的共轭关系来实现对入射光线的控制,从而调节照明的明暗,还可以利用视场光阑与样品平面的共轭关系来实现对照明范围的控制,从而调节照明的区域^[27]。

3 基于仿真的光路设计及均匀度计算

3.1 照明系统参数要求

本研究选用工作波长为 $0.520 \mu\text{m}$ 的激光以产生完美涡旋光,并利用目数为 80 的双面磨砂散射片形成动态散斑。光源宽度 y_0 设定为 2 mm 。在照明目标端,系统需适配放大倍数 MAG 为 40、数值孔径 NA 为 0.65 的标准物镜,该物镜的焦距 f 为 4.5 mm ,视场数 FN 为 22。以 POV 中心为原点,光轴方向为 z 轴正向,垂直于光轴的方向为 y 轴建立右手笛卡尔坐标系。则物方视场半径 y' 为:

$$y' = \frac{FN}{2 \times MAG} = 250 \mu\text{m} = 0.25 \text{ mm}. \quad (6)$$

由照明系统的拉氏不变量应不小于物镜的拉氏不变量^[22]可以得到集光镜的初始孔径角 u_0 应满足:

$$n_0 u_0 y_0 \geq n' u' y'. \quad (7)$$

由于系统工作环境为空气,所以 $n_0 = n' = 1.0$,光源宽度 $y_0 = 2 \text{ mm}$, $u' \approx NA = 0.65$,则:

$$u_0 \geq \frac{y' u'}{y_0} = \frac{0.25 \times 0.65}{2} = 0.089 \text{ rad}. \quad (8)$$

根据上述设定的参数,将科勒照明系统划分为集光镜与聚光镜两个部分进行设计。

3.2 集光镜

集光镜用于收集来自光源的光线,提高光源的利用效率。为减小像差^[28]并比较不同材料对照明均匀性的影响,本文构建了一种由双胶合透镜与单透镜组成的三片式科勒照明集光镜结构,

并分别以冕牌玻璃 H-ZK9A(下文简称为“H-ZK9A 集光镜”和“H-ZK9A 系统”)和火石玻璃 ZF2(下文简称为“ZF2 集光镜”和“ZF2 系统”)作为单透镜材料。其中 H-ZK9A 的折射率 $n_d = 1.6204$ 。阿贝数为 $\nu_d = 60.368$,而 ZF2 材料的折射率 $n_d = 1.6727$,阿贝数为 $\nu_d = 30.181$ 。

设双胶合透镜与单片透镜的光焦度之比为 0.5,两个密接透镜的合成焦距 f' 为 25 mm,以避免单个透镜曲率过大,也为后续优化留出空间。即:

$$\begin{cases} \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{f_2}{f_1} = 0.5 \\ f' = \frac{f_1 f_2}{f_2 + f_1} = 25.0 \end{cases}, \quad (9)$$

其中: f_1, f_2 分别为双胶合透镜和单片透镜的焦距。由式(9)可知 $f_1 = 75.0$ mm, $f_2 = 37.5$ mm。

又由光圈数 $F = 3$ 和 f' 可以得到入射高 h 为:

$$h = \frac{f'}{2F} = 4.17 \text{ mm}. \quad (10)$$

在 ZEMAX 中设置入瞳直径 D (Entrance Pupil Dia) 为入射高 h 的 2 倍值,即 8.34 mm。

双胶合透镜采用 Thorlabs 成品透镜 (AC254-075-A-ML)。为保证参数一致,直接导入 Thorlabs 官网提供的该透镜 ZEMAX 模型文件。为提高光通量利用率,光源需置于集光镜的一倍焦距到两倍焦距内,因此将物距 l_1 设置为 40 mm。此时集光镜的初始孔径角 $u_0 = 0.104$ rad,满足拉氏条件。

将单片透镜设计为平凸型结构,平面在后。

根据理想光学原理,两个单透镜的曲率半径分别为:

$$\begin{cases} R_{\text{H-ZK9A}} = (n-1)f_2 = 23.27 \text{ mm} \\ R_{\text{ZF}} = (n-1)f_2 = 25.23 \text{ mm} \end{cases}. \quad (11)$$

为保证整体结构的协调性,将单透镜厚度设为 7 mm,置于双胶合透镜后方 1 mm 处。通过快速聚焦功能确定后焦距初值,并将单透镜的曲率半径与后焦距设为优化变量。在 ZEMAX 中,设置了包含焦距控制、球差校正和慧差校正操作数的综合评价函数用于后续优化。通过迭代优化,当系统的评价函数收敛至最小值时,相关像差得到了最大程度的抑制。优化结果如图 2 和表 1 所示:H-ZK9A 集光镜在焦距为 30.466 mm 时成像效果最佳;而 ZF2 集光镜在焦距为 27.829 mm 时成像最优。

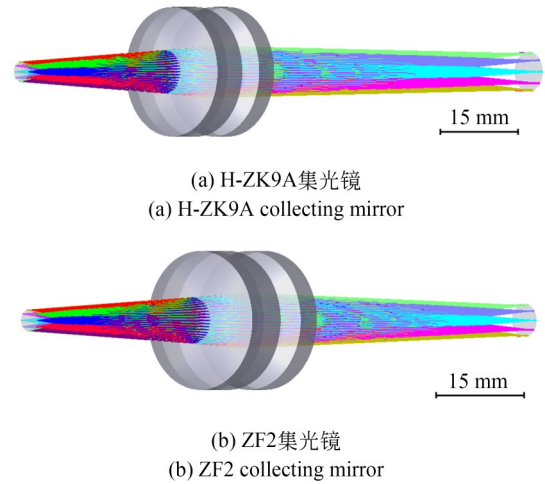


图2 集光镜三维布局图

Fig. 2 Three-dimensional layouts of collecting mirrors

表1 集光镜优化结果

Tab. 1 Optimization results of collecting mirror

Collecting mirror	Radius of curvature R /mm		Back focal length BFL /mm		Effective focal length f /mm
	Original	Optimized	Original	Optimized	
H-ZK9A	23.27	29.697	53.207	83.299	30.466
ZF2	25.23	27.931	53.246	60.294	27.829

3.3 聚光镜

导入 Thorlabs 成品透镜 (AC254-030-A-ML) 作为聚光镜,设定集光镜的像面为孔径光阑面。将聚光镜置于孔径光阑后 30 mm,使孔径光阑位

于其物方焦平面,并以该距离作为优化变量。使用默认评价函数进行优化,结果如图 3 所示,其中 (a)、(b) 分别为 H-ZK9A 系统、ZF2 系统的三维布局图。

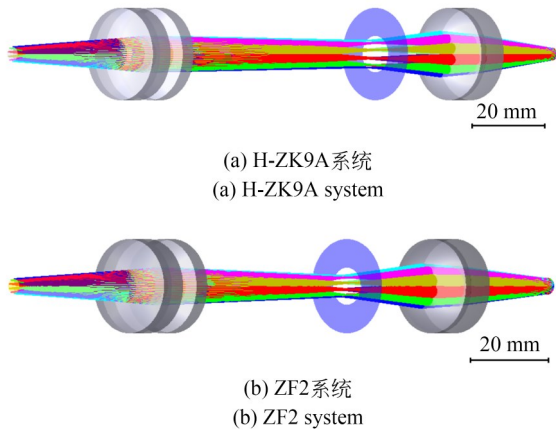


图3 科勒照明系统三维布局图

Fig. 3 Three-dimensional layout of the Köhler illumination system

4 仿真性能评估

4.1 单波长

图4为H-ZK9A系统、ZF2系统在像面的均匀度效果图,其中(a)、(b)分别为两个系统的全

视场点列图,结合图(c)的相对照度曲线可以看出两个系统在像面均呈现形状规则且波动极小的现象。图(d)为两个系统的圈入能量曲线,拟合优度 R^2 均接近1,表明圈入能量随半径变化的规律平滑一致,光斑能量分布稳定。此外,H-ZK9A曲线在较小半径下即可达到更高比例的总能量,体现出更优的光斑集中能力。

需要特别说明的是,虽然MTF曲线通常多用于表征成像系统对不同空间频率细节的分辨能力,但在本研究中,利用其从空间频域的角度定量评估照明光场的平滑化能力。由图(e)所给的MTF曲线可知两种系统在零空间频率处调制度接近1,并在低空间频率区域迅速衰减,表明照度分布以直流分量为主,高频非均匀成分得到有效抑制,从而实现均匀、无纹理照明,符合科勒照明的设计目标。

由于涡旋光源具有旋转对称性,像面照度分布同样呈旋转对称结构。本研究以 $+y$ 方向的相对照度分布为例,采用ANSI/NAPM IT7.228标

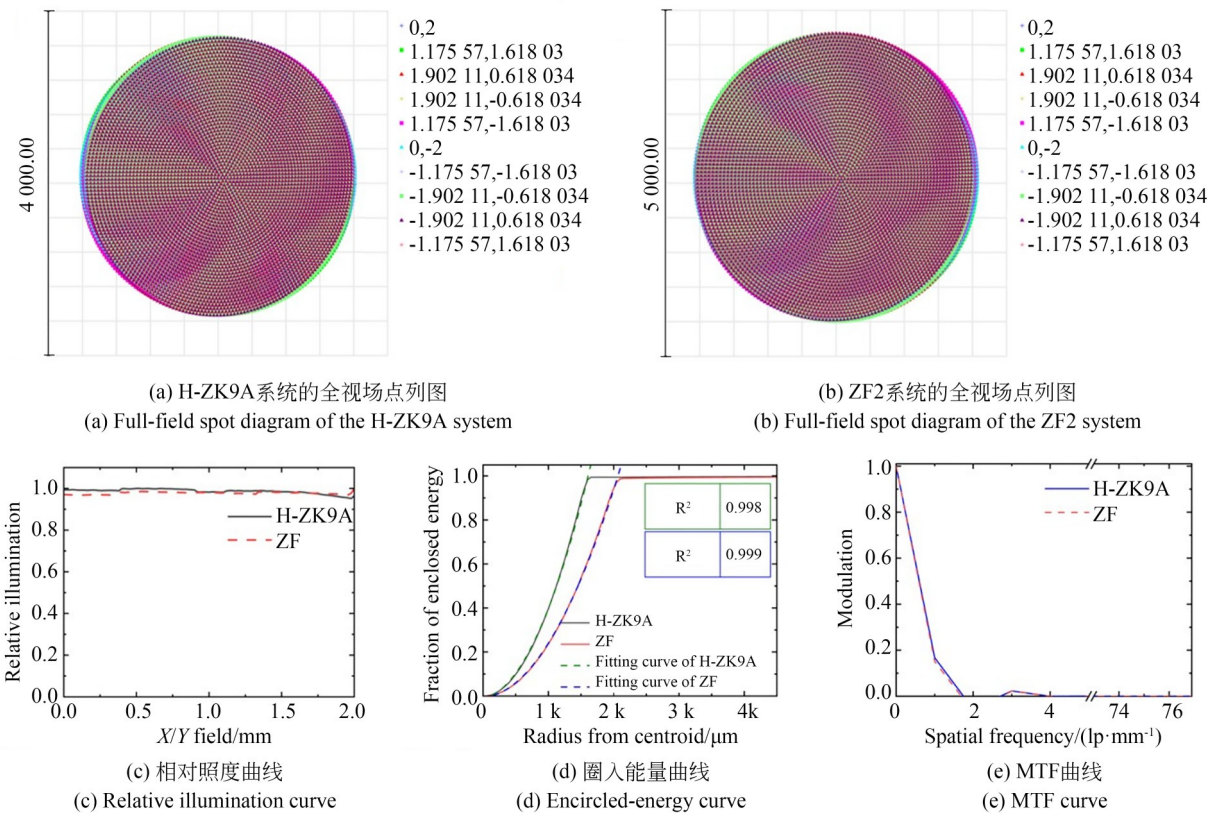


图4 单波长科勒照明系统仿真结果

Fig. 4 Single-wavelength simulation results of Köhler illumination system

准中规定的9点测试法^[22,27,29]计算照度均匀度,其表达式如下:

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{\text{avg}}}, \quad (12)$$

其中: E_{\min} , E_{avg} 分别为照明面的最小照度值和平均照度值。

为进一步表征照度离散程度,引入均方根误差 $RMSE$,定义:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (E_i - E_{\text{avg}})^2}, \quad (13)$$

其中: m 为样本数量, E_i 为第 i 个点的照度值。

结果如表2所示,两个系统的照度均匀度均高于95%,其中H-ZK9A系统的均匀度为96.5%,而ZF2系统达到98.9%,对应的RMSE分别为0.011和0.0056,均小于数据范围的2%,表明照度分布在整个视场内较为均匀,未出现明显亮斑或暗区。综合以往的仿真研究结果,传统科勒照明系统在照明均匀度方面已达到约87%~93%,能够满足常规显微成像与光学测量需求。而本研究在此基础上引入完美涡旋光散斑,进一步提升了光场分布的均匀性与系统稳定性,为精密成像提供了更优的光学条件。

表2 单波长科勒照明系统照明均匀度结果

Tab.2 Illumination uniformity results of a single-wavelength Köhler illumination system

System	E_{\min}	E_{avg}	U	RMSE
H-ZK9A	0.952	0.986	96.5%	0.011
ZF2	0.967	0.978	98.9%	0.0056

对比不同单透镜材料,ZF2系统均匀度优于H-ZK9A系统,这是由于在单色光条件下色差对成像质量影响显著降低,透镜的折射率与面形设计成为影响照明均匀性的主要因素。相较于H-ZK9A,ZF2玻璃的折射率相对更高,使其能够在相同焦距下采用更平缓的曲面结构,从而有效减小了球面像差引起的近轴与离轴光线传播偏差,提高照明均匀性。

为了进一步验证所设计的科勒照明系统在真实物理条件下的照明性能与能量分布,本文将序列模式下的结构转换至非序列模式中进行光

线追迹。

本文采用带有中心遮挡的椭圆形光源来模拟环形照明光束。同时,利用MATLAB生成网格矢高透镜所需的螺旋相位数据。通过振幅与相位联合调制合成POV光束后,在网格矢高透镜后方放置了一个基于高斯散射模型的散射片以产生散斑场,得到的POV光相干辐照度图与相干相位图分别如图5(a)、(b)所示,经散射片调制后形成的散斑相干辐照度图如图5(c)所示,表现出明显的随机颗粒特性。

为模拟动态散斑在像面的照明分布,本研究结合软件算法与数据后处理对辐照度场进行了均匀化模拟。首先,在ZEMAX非序列模式下将探测器平滑度设为25,以初步平滑光线追迹产生的统计噪声获取如图5(e)、(h)所示的科勒照明辐照度图。随后,将剖面数据导入MATLAB利用高斯平滑算法进行二次处理,以进一步模拟实际实验中旋转散射片引起的时间平均效应,其结果如图5(f)、(i)所示。相比之下,如图5(d)、(g)所示,临界照明系统即便经同等处理,仍呈现出明显的环形不均匀特性。

利用式(12)、(13)对上述横、纵剖面的均匀度进行计算,结果如表3所示。可以发现临界照明下,两种系统的横向与纵向均匀度低于70%,且RMSE超过数据范围的15%,凸显了完美涡旋光固有的不均匀能量分布特征。相较于临界照明,科勒照明将系统的整体照度均匀度提升了25%,ZF2系统的均匀度甚至提升了约30%,相应的RMSE也减小至数据范围的5%左右,这充分证明了科勒照明结构能够有效克服环形强度分布的缺陷,实现平坦的均匀化照明。

需要说明的是,非序列模式下的均匀度略低于序列模式,这主要是因为非序列模式引入了螺旋相位调制与高斯散射模型以还原真实的物理过程。散斑光场固有的随机颗粒特性与干涉起伏打破了理想光场的平滑性,导致均匀度数值相对下降,但这更加真实地反映了物理实验中的光场演化规律。

4.2 多波长

在照明系统的设计与评价中,单波长模拟能够用于检验系统在理想色散条件下的基本成像与均匀性特征,但实际应用通常涉及宽光谱光

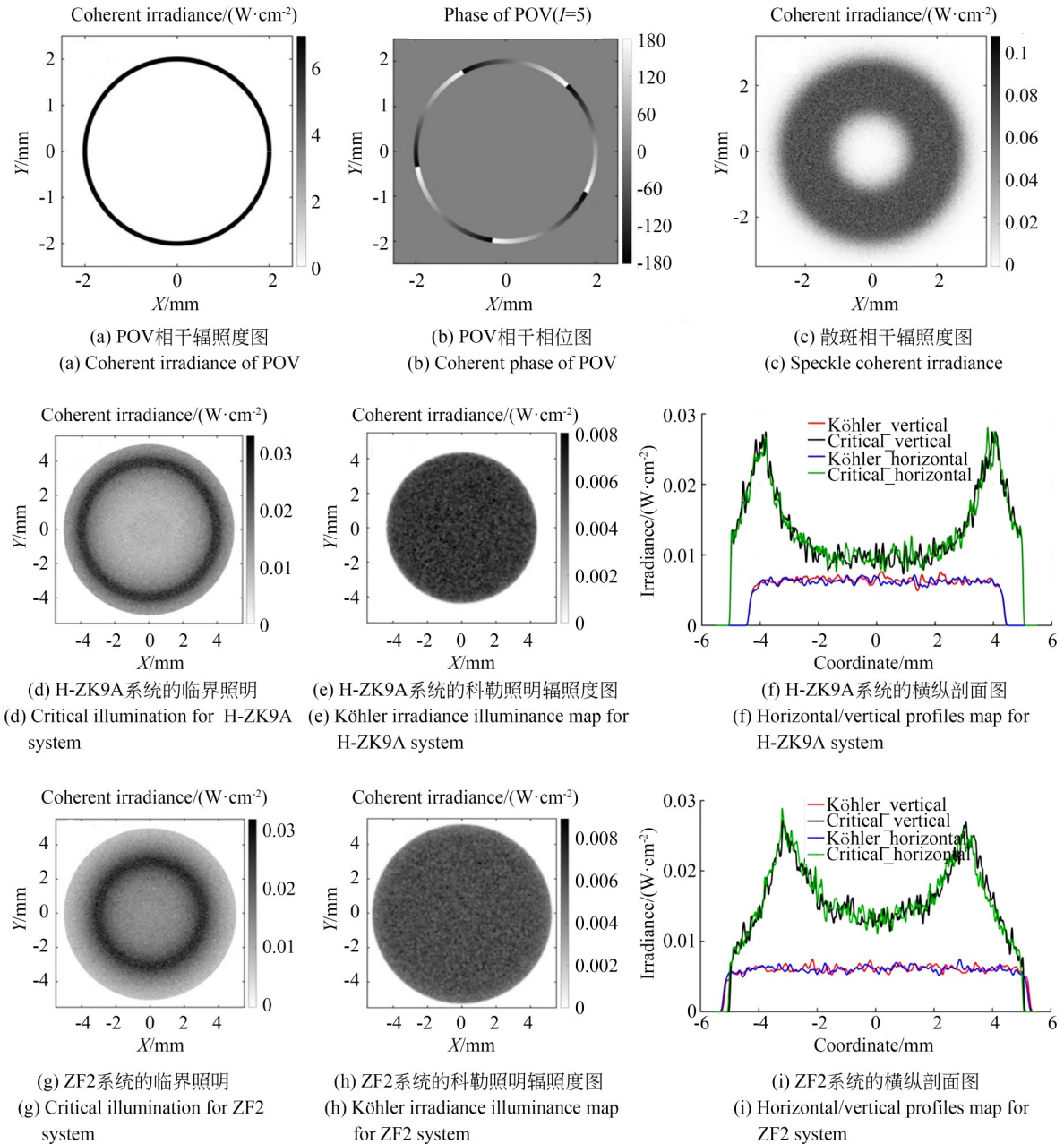


图5 非序列模式下单波长模拟结果

Fig. 5 Single-wavelength simulation results in non-sequential mode

源,因此不同波长下的像质一致性是评估系统稳定性的重要指标,所以本研究将进一步对两个系统在 $0.450\ \mu\text{m}$, $0.532\ \mu\text{m}$, $0.635\ \mu\text{m}$ 多波长条件下的均匀度进行分析,结果分别如图6和图7所示。

观察图6(a)~6(c)及图7(a)~7(c)的全视场点列图可知,两者均能保持规则且一致的点迹结构,说明色差对均匀性的影响较小。进一步,根

据图6(d)和图7(d)的相对照度曲线,两个系统在宽波段内均具有良好的照度均匀性。此外,图6(e)和图7(e)的圈入能量曲线拟合优度 R^2 均接近1,证实了径向能量分布的高度一致性。然而,由于火石玻璃相较于冕牌玻璃阿贝数偏低,会引入更多难以校正的色差,导致ZF2系统在多波长条件下的点列重合度与能量结构一致性略逊于H-ZK9A系统。

表3 单波长不同照明方式均匀度对比

Tab. 3 Comparison of illumination uniformity for a single-wavelength under different illumination methods

System	illumination method		$E_{max}/$ ($mW \cdot cm^{-2}$)	$E_{min}/$ ($mW \cdot cm^{-2}$)	$E_{avg}/$ ($mW \cdot cm^{-2}$)	U	RMSE/ ($mW \cdot cm^{-2}$)
H-ZK9A	Critical illumination	horizontal	26.149	8.307	12.693	65.45%	4.481
		vertical	26.313	8.257	12.640	65.33%	4.727
	Köhler illumination	horizontal	7.316	5.795	6.358	91.14%	0.321
		vertical	7.060	5.891	6.416	91.83%	0.263
ZF2	Critical illumination	horizontal	27.355	10.011	16.929	59.13%	4.084
		vertical	26.195	10.224	16.880	60.57%	4.009
	Köhler illumination	horizontal	6.744	5.687	6.293	90.36%	0.281
		vertical	7.134	5.780	6.288	91.92%	0.320

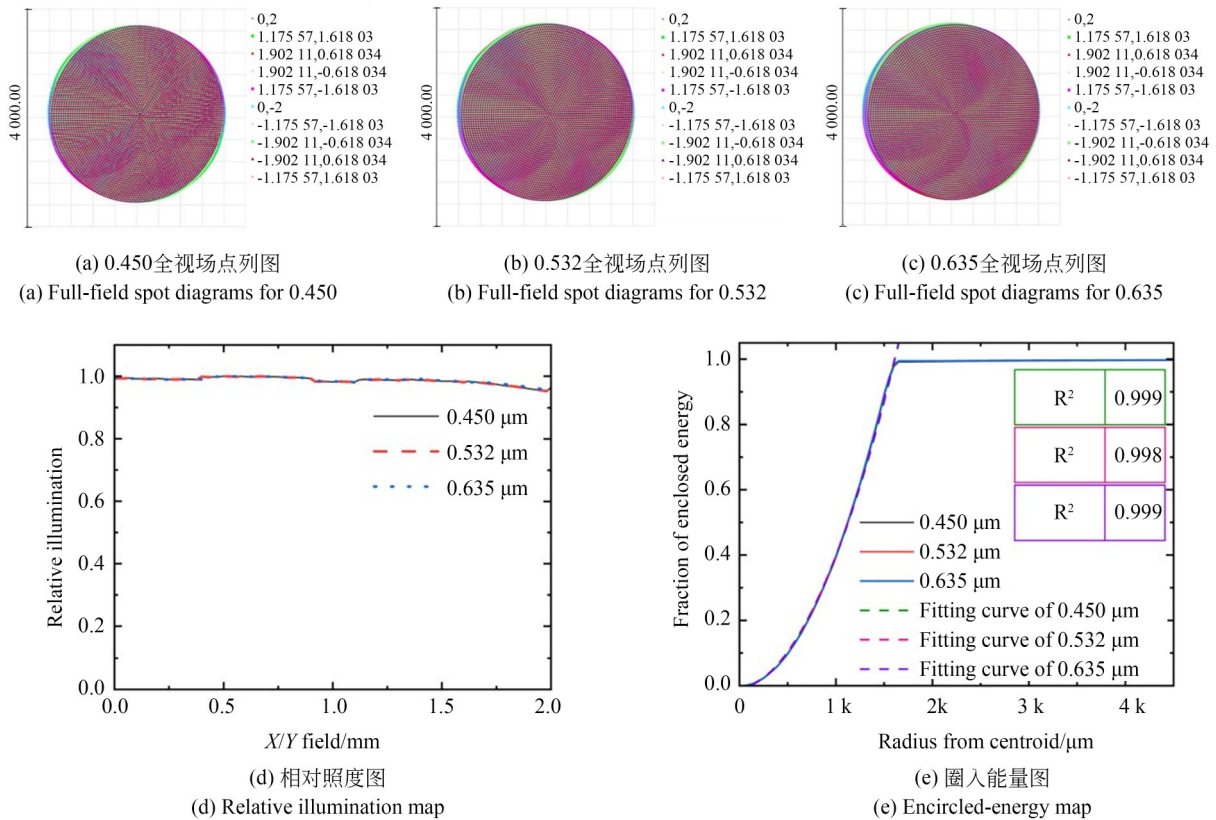


图6 多波长H-ZK9A系统仿真结果

Fig. 6 Simulation results of the multi-wavelength H-ZK9A system

两个系统在多波长条件下的均匀度结果如表4所示。H-ZK9A系统与ZF2系统在3个波长下的均匀度分别稳定在96%与98%以上,且对应的RMSE均控制在数据范围的2%以内,充分证明在可见光宽波段范围内两个系统仍可实现稳定且高均匀性的照明。适用于宽谱照明场景。

两个系统的垂轴色差曲线如图8所示。在0~2 mm的视场内,各波长的垂轴色差曲线均位于Airy斑范围之内,说明系统具有良好的色差校正能力,有利于在宽波段条件下保持稳定的照明与成像性能。

非序列模式下,H-ZK9A与ZF2系统的多波长模拟结果分别如图9~图10所示,对应横纵剖

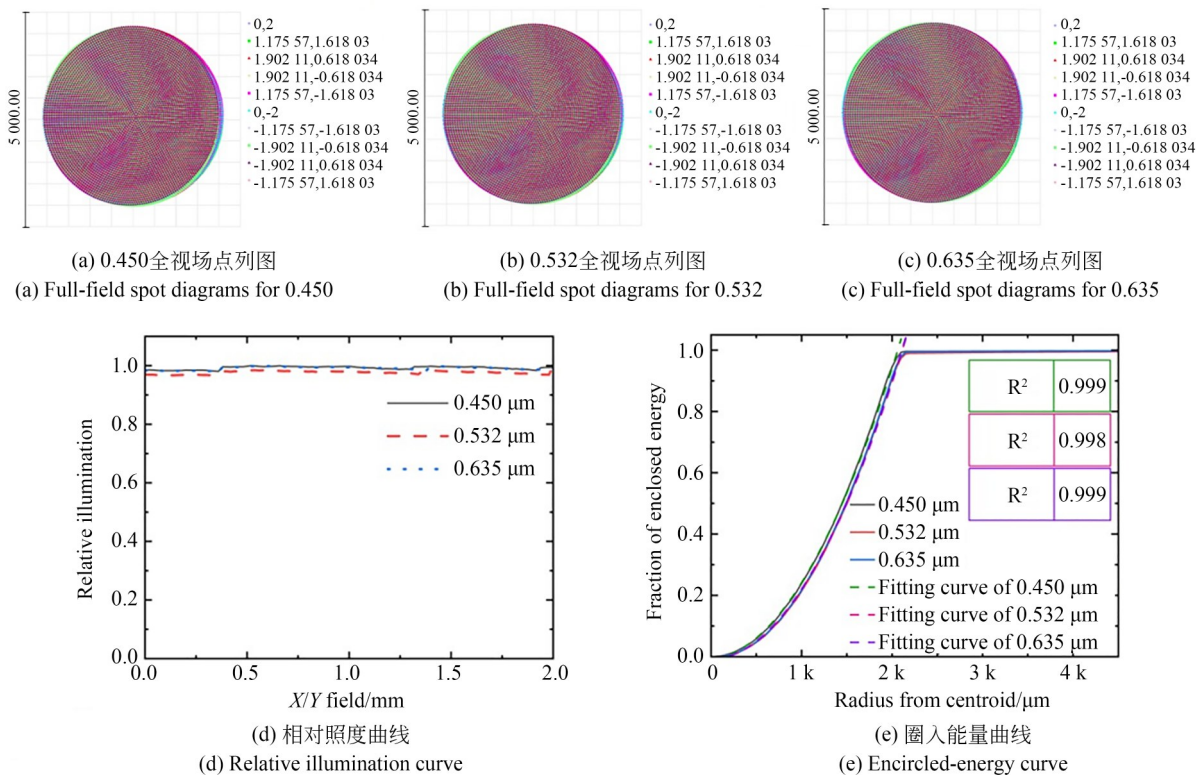


图7 多波长ZF2系统仿真结果

Fig. 7 Simulation results of the multi-wavelength ZF2 system

表4 多波长均匀度结果。

Tab. 4 Uniformity results of the multi-wavelength.

System	Wavelength/ μm	E_{min}	E_{avg}	U	RMSE
H-ZK9A	0.450	0.954	0.986	96.7%	0.011
	0.532	0.952	0.986	96.5%	0.011
	0.635	0.954	0.987	96.7%	0.010
ZF2	0.450	0.981	0.992	98.8%	0.005
	0.532	0.967	0.977	99.0%	0.006
	0.635	0.981	0.991	99.0%	0.005

面的均匀度及RMSE值如图11所示。数据表明,相较于临界照明,所设计的科勒照明在各测试波长下均使系统的均匀度实现了显著跃升,并将RMSE值大幅压缩至极低水平。此外,在宽波段范围内,两个系统的均匀度与RMSE指标波动极小,充分证明所设计的科勒照明系统具有出色的宽谱适应性,能够稳定、有效地克服环形光强带来的不均匀缺陷,在宽波段范围内实现高平坦度的均匀化照明。

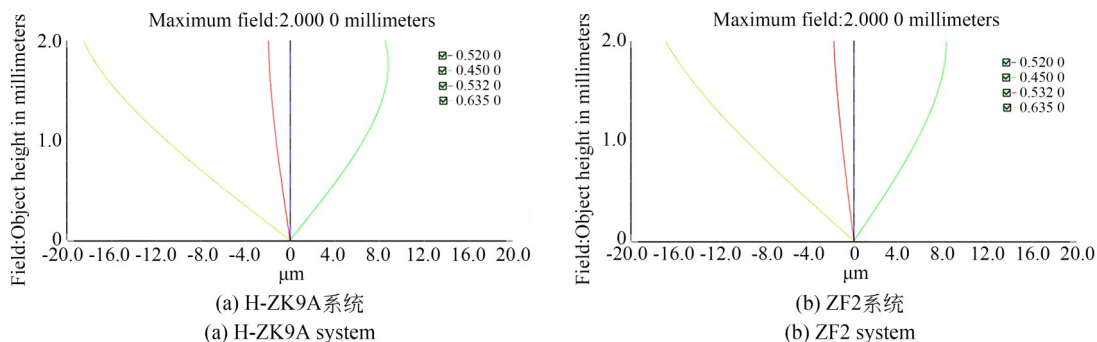


图8 垂轴色差曲线

Fig. 8 Lateral chromatic aberration curve

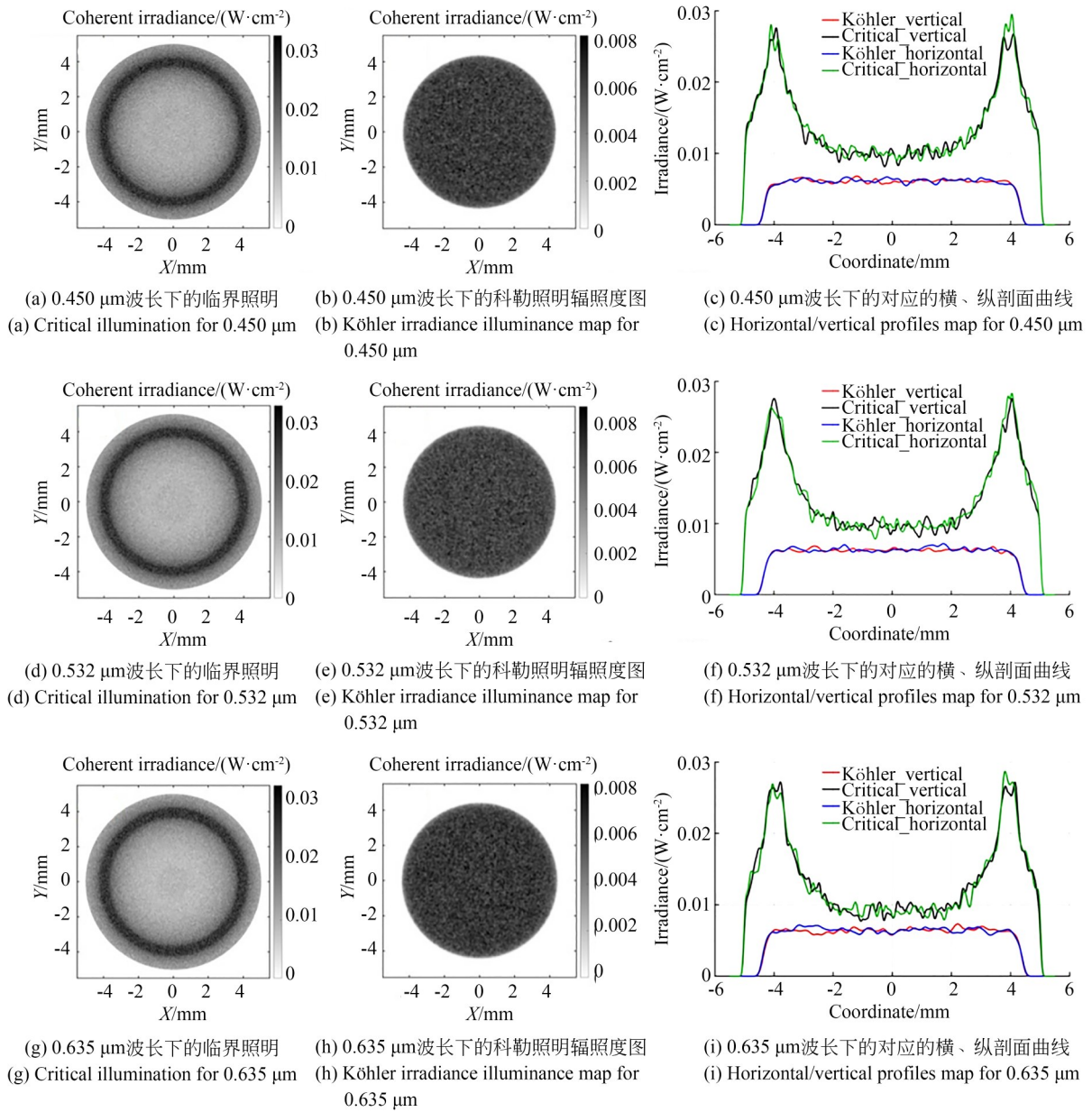
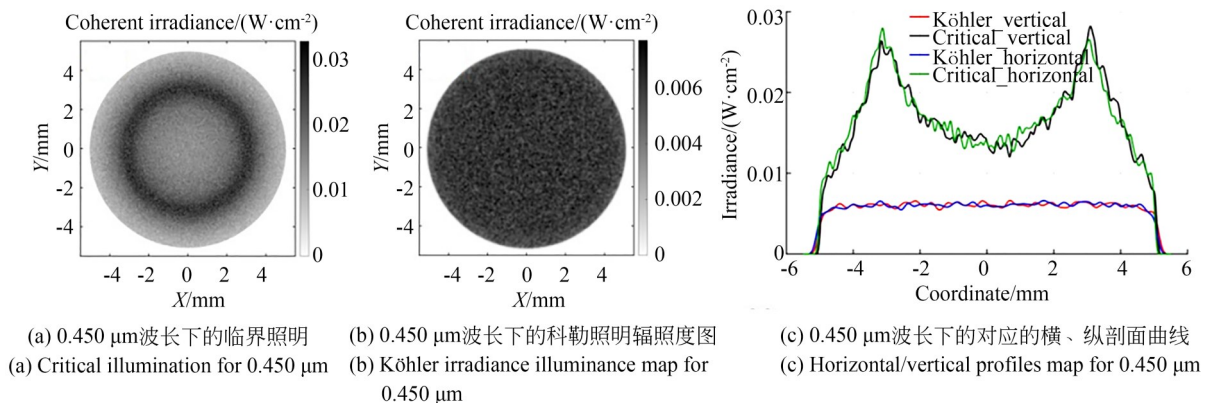


图9 非序列模式下H-ZK9A系统多波长模拟结果

Fig. 9 Multi-wavelength simulation results for the H-ZK9A system in non-sequential mode



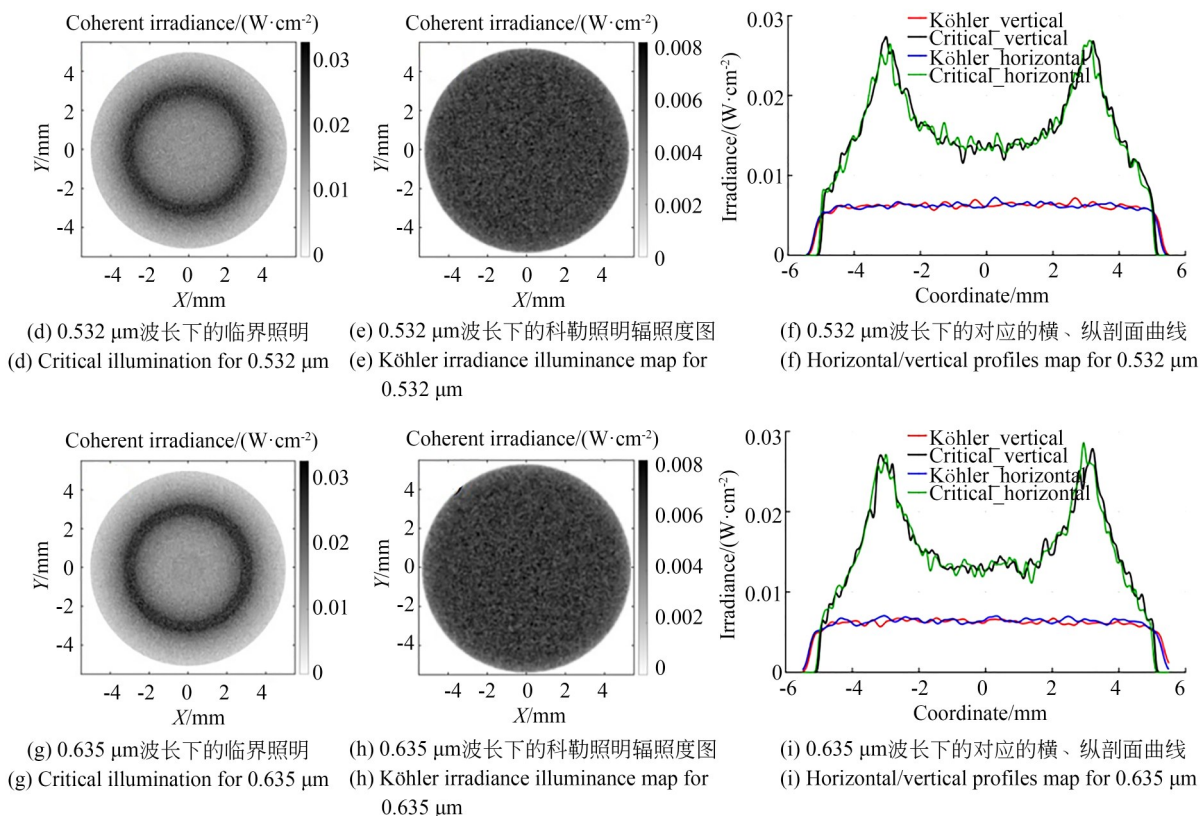


图 10 非序列模式下 ZF2 系统多波长模拟结果

Fig. 10 Multi-wavelength simulation results for the ZF2 system in non-sequential mode

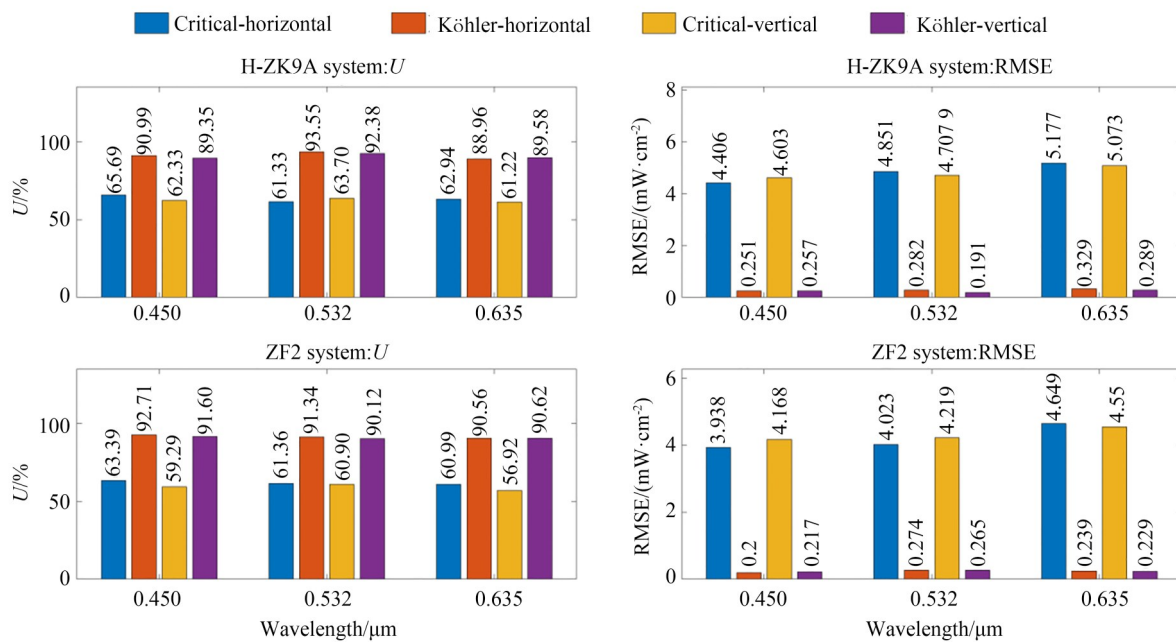


图 11 非序列模式下多波长均匀度结果

Fig. 11 Multi-wavelength uniformity results in non-sequential mode

4.3 散斑光场统计特性分析

在评价特殊结构光散斑照明系统时,除了传统的宏观照度均匀性指标外,散斑自身的微观统计特性更是决定后续成像分辨率与测量精度的关键。因此,本研究对 $0.520\ \mu\text{m}$ 的波长下像面静态散斑光场的对比度及空间自相关函数进行了分析,其结果如图 12 所示。

散斑对比度 C 常用于表征散斑的发育程度^[30],其定义如下所示:

$$C = \sigma_I / \langle I \rangle, \quad (14)$$

其中: σ_I 为光强标准差, $\langle I \rangle$ 为平均光强。基于图 12(a)、(d) 的像面散斑分布计算得出, H-ZK9A 系统与 ZF2 系统的散斑对比度分别为 0.999 7 和 1.000 8, 表明经科勒照明系统匀化后, 照明面接收到的依然是充分发育的散斑场, 说明系统并未破坏光波的微观相干特性。

根据范西特-泽尼克定理^[30], 在经过散射介质或在自由空间传播后, 散斑场的空间相关函数由光源强度分布的傅里叶变换决定, 对于 POV 光, 其照明孔径可以近似为一个狄拉克函数环。这种环形光产生的散斑, 其强度的空间自相关函数 $C_I(\Delta r)$ 遵循一阶零次贝塞尔函数的平方分布, 而散斑的平均尺寸通常由强度自相关函数的中心主瓣宽度来定义, 因此可以得到 POV 散斑场在傅里叶平面的自相关尺寸为:

$$FWHM \approx 0.716 \frac{\lambda f_{\text{eff}}}{D}, \quad (15)$$

其中, D 为环形光源的直径, 本研究设定为 $4\ \text{mm}$; f_{eff} 为科勒照明系统的有效焦距, 根据 ZEMAX 仿真结果, 可知 H-ZK9A 系统与 ZF2 系统的有效焦距分别为 $16.77\ \text{mm}$ 和 $21.53\ \text{mm}$, 将结果代入上式, 计算可得两种系统像面散斑的理论

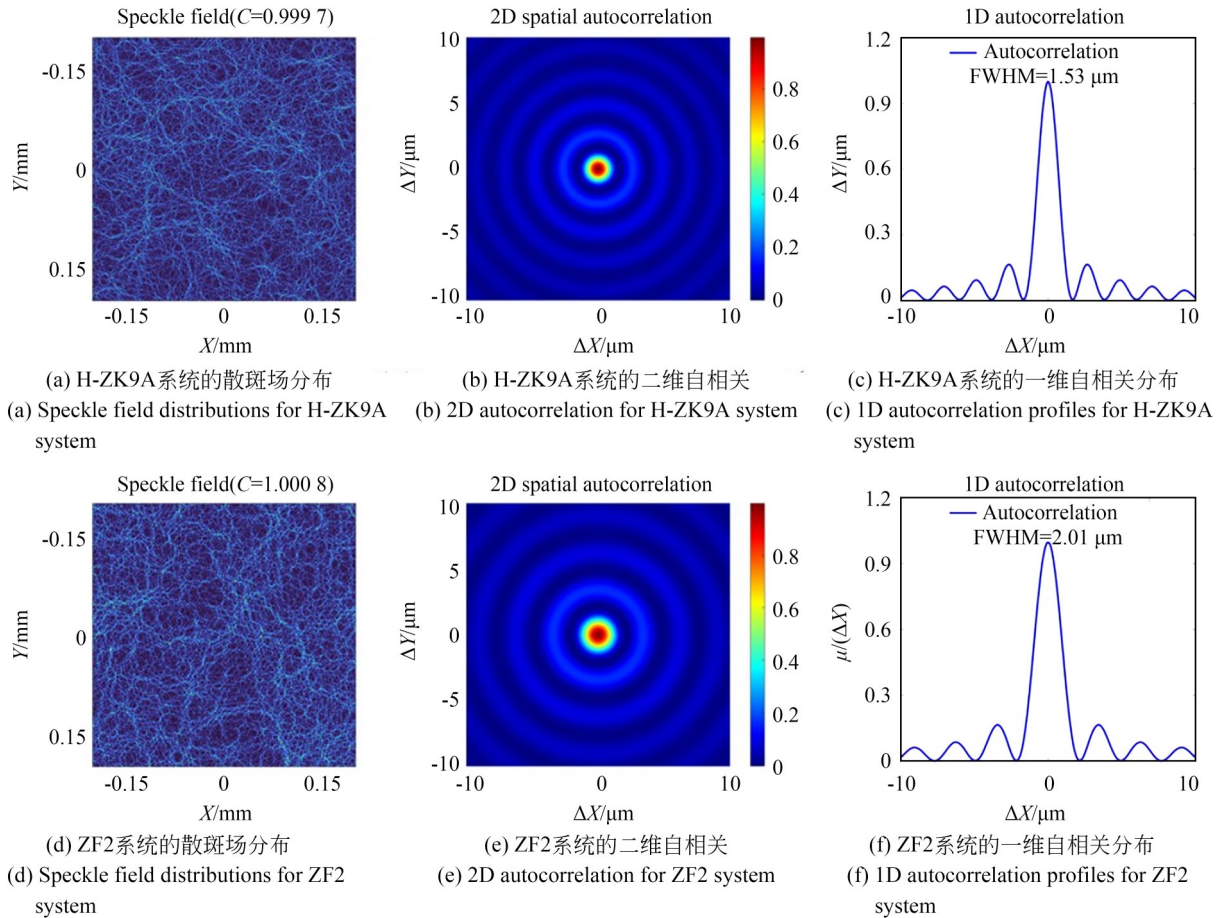


图 12 静态散斑统计特性

Fig. 12 Statistical properties of static speckles

FWHM分别为 $1.56\ \mu\text{m}$ 与 $2.00\ \mu\text{m}$ 。根据图12,基于仿真得到的实际特征尺寸 $1.53\ \mu\text{m}$, $2.01\ \mu\text{m}$ 与理论结果高度吻合,充分证明了所设计的科勒照明系统在有效消除POV光宏观能量分布不均的同时,能够精确且无损地保留其微观物理特征。

5 实验验证

实验光路如图13所示,激光器所产生的高斯激光通过线偏振片调整为线偏振光,并利用半波片调节偏振方向以匹配SLM($1\ 920\times 1\ 080$ 像素,像素间距 $8\ \mu\text{m}$)的最佳调制效率。将SLM置于焦距为 $150\ \text{mm}$ 的K9平凸透镜的前焦面处,在透镜后焦面处形成强度分布呈环状且相位呈螺旋结构的完美涡旋光。最后利用目数为80的双面磨砂旋转散射片生成动态散斑,通过所设计的科勒照明系统后利用CCD($2\ 560\times 2\ 180$ 像素, $6.5\ \mu\text{m}$ 像素间距)采集光斑图像,实现照明的均匀性和稳定性。

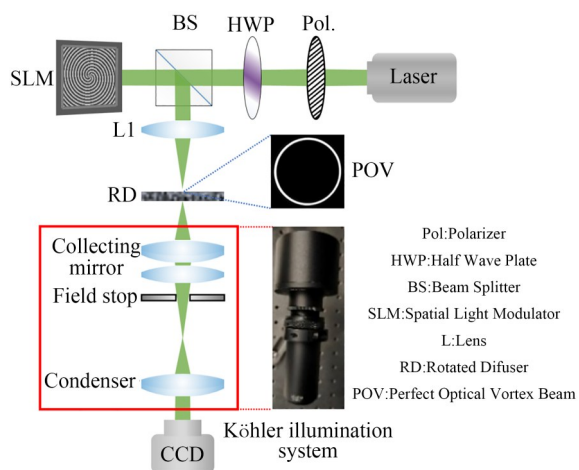


图13 实验光路示意图

Fig. 13 Experimental optical path diagram

由于SLM由离散像素构成,像素间存在物理间隙,因此对应的液晶层无法加载相位,这部分未被调制的光会反射回去产生零级光,叠加在环形涡旋光场中心,形成亮斑。为有效抑制该现象,本研究利用叠加闪耀光栅相位将有效信息转移到+1级衍射级,零级光因不携带调制信息而被分离。

根据模拟结果,ZF2系统在均匀性方面表现优于H-ZK9A系统,因此本研究在实验部分选用ZF2系统进行验证。利用MATLAB对采集到的光斑区域进行均匀性分析,结果如图14所示。作为对比,首先通过临界照明方式获取了完美涡旋光的静态和动态散斑图像,如图(a)和(b)所示;图(c)和(d)则分别为采用所设计的科勒照明系统所获得的静态与动态散斑图像,从中可清晰观察到光斑边缘处视场光阑的轮廓。观察(c)、(d)可发现完美涡旋光经旋转散射片后,随着散射片的快速旋转,输出的散斑图样随时间发生快速且随机的去相关演化。在CCD相机的积分时间内,大量相互独立的动态散斑场发生了非相干叠加,这种时间平均效应大幅度降低了散斑对比度,从而物理上平滑了由于干涉产生的局部剧烈明暗起伏。而科勒照明系统的均匀化作用进一步消除了光强的径向差异,使得最终成像中的亮度分布趋于平坦,因此散斑图像不再呈现完美涡旋光典型的环形强度分布。进一步,分别提取两种照明方式下动态散斑图案中光斑的横、纵向及中间矩形区域灰度剖面数据,并进行平滑处理以抑制CCD的读出噪声和散粒噪声,结果如图(e)、(f)所示。

剖面数据如表5所示。对于临界照明,横、纵向剖面均匀度分别只有 54.87% 与 45.61% ,呈现出明显的“甜甜圈”状光强分布。相比之下,科勒照明的横、纵向均匀度提升至 86% 以上。随机截取的中心矩形区域实现了 87.27% 的均匀度,进一步表明核心成像范围内的光强分布已趋于平缓。

RMSE结果进一步验证了科勒照明系统效果的提升。实验测得临界照明的RMSE均超过数据范围的 10% ,而科勒照明下各剖面的RMSE均大幅降至 3.2 左右,中心区域更是仅为 2.7 ,小于数据范围的 5% ,充分证明了科勒照明能够显著改善POV散斑照明下的光强不均匀性。

此外,科勒照明通过将光源成像于孔径光阑位置,有效减少了因光线发散所带来的光损失,提高了光源的利用效率。在相同入射条件下,科勒照明的最大照度值达 $104\sim 108$,远高于临界照

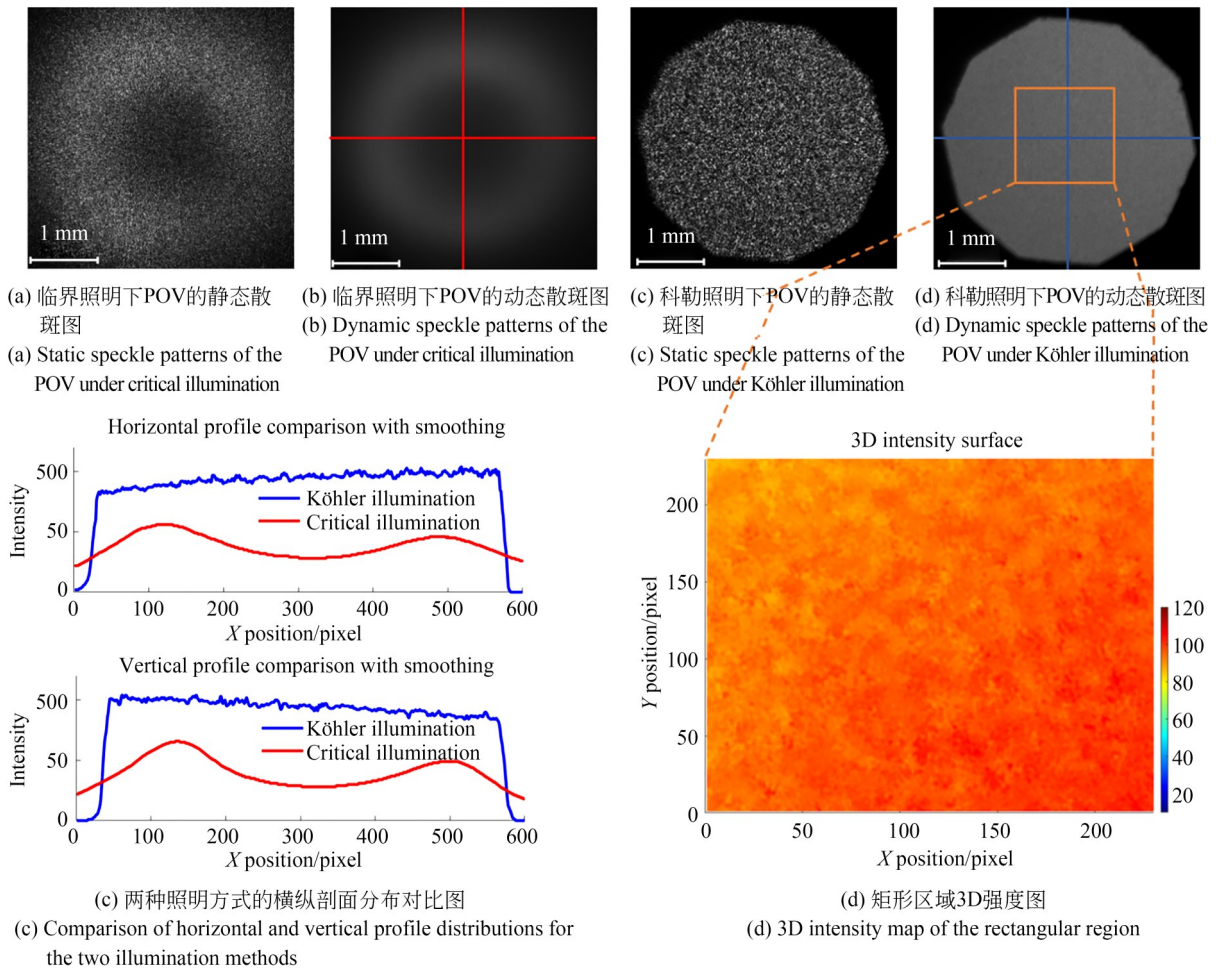


图 14 光斑成像结果对比

Fig. 14 Comparison of spot imaging results

表 5 两种照明方式的均匀度对比

Tab. 5 Comparison of uniformity between two illumination methods

illumination method		E_{max}	E_{min}	E_{avg}	Uniformity	RMSE
Critical illumination	Horizontal	56.00	21.00	38.27	54.87%	6.58
	Vertical	66.00	18.00	39.47	45.61%	7.31
Köhler illumination	Horizontal	104.00	81.00	94.11	86.07%	3.26
	Vertical	104.00	82.00	94.50	86.77%	3.20
	Rectangular region	108.00	83.00	95.10	87.27%	2.70

明的56~66,证明了科勒照明能够在保证均匀性的同时实现更高光能传输效率。

值得注意的是,实验中得到的科勒照明均匀度略低于仿真结果,这种差异反映了理论模型与真实物理环境之间的偏差。在实验过程中,光学

元件的对准精度是导致性能下降的主要原因。如位移台的定位误差使得孔径光阑的像面无法精确对应聚光镜的前焦面,同时光路中微小偏心或倾斜破坏了理想状态下的旋转对称性,直接导致横、纵向剖面均匀度存在细微差异。此外,

SLM 的像素化结构会产生未被调制的零级光, 虽通过叠加闪耀光栅分离, 但经散射片作用后的残余分量仍会形成全视场背景噪声。再加上实验室杂散光以及 CCD 在边缘低照度区域的暗电流噪声, 这些因素共同限制了最小照度的提取, 导致实验结果低于理论预期。但从整体看, 系统在干扰下仍将均方根误差控制在较低水平, 证明了科勒照明在实际应用中具有良好的平坦度与稳定性。

但科勒照明系统并未改变散射介质本身的统计传输特性, 所以并不意味着完美涡旋光的相位特性丢失。涡旋光所携带的螺旋相位因子 $\exp(il\theta)$ 在散射后转化为散斑场中的统计角向相关特征。从傅里叶光学角度来看, 本研究所设计的科勒照明系统本质上是一个线性空间不变系统。设目标照明面的极坐标为 (ρ, φ) , 照明面上的散斑光场 $E_{\text{obj}}(\rho, \varphi)$ 可以通过 OAM 谱展开成不同本征模式的线性叠加:

$$E_{\text{obj}}(\rho, \varphi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m(\rho) \exp(im\varphi), \quad (16)$$

其中, $A_m(\rho)$ 为各阶 OAM 模式的复振幅系数。由于科勒照明实质上完成了散斑角谱的傅里叶变换, 透镜组与孔径光阑的低通滤波作用主要平滑了导致宏观不均匀的低频强度包络, 而代表入射光拓扑荷数 l 的核心相位信息并未被破坏, 而是以统计规律保留在各阶模式的功率谱 $\langle | \cdot | \rangle$ 中。

进一步地, 散斑场的空间相位结构可通过散斑强度的角向互相关函数 $C(\Delta\varphi)$ 予以表征:

$$C(\Delta\varphi) = \frac{\langle I(\rho, \varphi) I(\rho, \varphi + \Delta\varphi) \rangle}{\langle I(\rho, \varphi) \rangle^2}. \quad (17)$$

在理论上, 该互相关函数会呈现出受入射拓扑荷数 l 调制的周期性振荡特征。这从物理机制上证明了尽管宏观强度呈现均匀分布, 但 POV 光束的微观干涉条件与相位特性依然完整守恒, 并可通过散斑互相关或 OAM 模式敏感重构法进行提取^[31, 12-13]。目前, 针对均匀化后散斑场 OAM 提取的相关实验工作正在开展中, 从而对上述拓扑相位信息的无损传输与演化特性进行定量的系

统性研究。

6 结 论

本文基于 ZEMAX 光学设计平台成功设计并优化了一套用于完美涡旋光散斑的高均匀性科勒照明系统。该系统采用三片式集光镜与双胶合聚光镜的组合结构, 通过对冕牌玻璃 H-ZK9A 与火石玻璃 ZF2 的单透镜进行对比设计与优化, 显著提升了照明均匀性。序列模式的仿真结果表明, 在单波长条件下, 两种系统的照度均匀性均超过 96%, 其中 ZF2 材料方案的均匀性最高可达 98.8%, 且均方根误差显著降低。进一步在引入螺旋相位调制与高斯散射模型的非序列模式中, 科勒照明架构依然表现优异, 均匀度维持在 91% 左右, 克服了临界照明的环形缺陷。在多波长条件下, 无论是在序列模式下还是非序列模式下, 所设计系统在可见光范围内均保持良好的照度一致性, 其中 H-ZK9A 系统在宽频照明中引入的色差较小, 而 ZF2 系统在宽波段内依然维持了接近 99% 的高均匀性, 表明该照明方案同样适用于宽谱照明场景。

此外, 对像面静态散斑光场的统计分析发现, 所生成的散斑在像的对比度均接近 1, 表明经科勒照明系统匀化后, 照明面接收到的依然是充分发育的散斑场, 即系统并未对光场的微观相干特性产生显著影响。同时, 基于仿真计算得到的 H-ZK9A 系统与 ZF2 系统的 FWHM 分别为 $1.53 \mu\text{m}$ 、 $2.01 \mu\text{m}$, 对应各自系统的散斑平均尺寸, 与理论结果基本吻合, 表明所设计的科勒照明系统在有效消除 POV 光宏观能量分布不均的同时, 能够精确且无损地保留其微观物理特征。

在实验部分, 本研究通过 SLM 生成完美涡旋光, 并结合旋转扩散片实现动态散斑照明。结果显示科勒照明在横向、纵向及矩形区域内的均匀性均超过 86%, 其中随机截取的中心矩形区域实现了 87.27% 的均匀度, 且各剖面 RMSE 值均低于 5%。实验结果略低于理论值主要源于真实物理环境的客观限制, 如光学元件对准精度误差

破坏了理想的旋转对称性,空间光调制器的零级光残余引入了背景噪声,杂散光与CCD暗电流则干扰了最小照度的精确提取等。尽管存在上述物理干扰,实验结果仍充分验证了与临界照明相比,所设计科勒照明系统在实际应用中具有良好的平坦度与稳定性。

本研究不仅为解决结构光照明的均匀性问题提供了有效方案,还展示了科勒照明系统在保留结构光特性、提升成像质量方面的优势,为特殊结构光在显微成像、光通信、精密测量等领域的进一步应用奠定了坚实基础。未来可结合多波长光源与DMD等动态调制器件,此外,课题组目前正在开展基于涡旋光散斑相关性实现OAM的提取工作,进一步深入探讨并验证高均匀化照明下POV光束拓扑相位信息的无损传输与演化机制。

参考文献:

- [1] 周美玲. 基于散斑相关性的散射介质后成像研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2019.
ZHOU M L. *Study on Post-Imaging of Scattering Media Based on Speckle Correlation* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [2] JIANG X T, ZHOU N S, WANG Y J, *et al.* High-resolution label-free cell imaging with angular information encoded dynamic speckle illumination [C]. *Quantitative Phase Imaging IX. January 28-February 3, 2023. San Francisco, USA.* SPIE, 2023: 44.
- [3] ZOU H W, ZHONG S Q, LU Y L, *et al.* Vortex beam dynamic speckle interference microscopy [J]. *Optics Letters*, 2025, 50(11): 3676.
- [4] FENG S C, KANE C, LEE P A, *et al.* Correlations and fluctuations of coherent wave transmission through disordered media [J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(7): 834-837.
- [5] JUDKEWITZ B, HORSTMAYER R, VELLEKOOP I M, *et al.* Translation correlations in anisotropically scattering media [J]. *Nature Physics*, 2015, 11(8): 684-689.

作者贡献声明:

杨如诗:论文构思、初稿写作、审核与编辑写作、数据整理、形式分析、调查研究、方法论、软件、验证、可视化呈现;

邹鸿玮:方法论、可视化、验证、调查研究、数据管理、软件、审核与编辑写作;

刘彧涵:可视化、验证、调查研究、数据管理、软件、审核与编辑写作;

曹睿:调查研究;

钟胜强:调查研究;

曾锴彬:调查研究;

吴稼驹:调查研究;

杨黎:获取资助、项目管理、提供资源、指导、审核与编辑写作;

蒋先涛:获取资助、项目管理、提供资源、指导、审核与编辑写作。

- [6] WANG Z P, JIN X, DAI Q H. Non-invasive imaging through strongly scattering media based on speckle pattern estimation and deconvolution [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 9088.
- [7] MANGRAVITI A, VOLPIN F, CHA J, *et al.* Intraoperative laser speckle contrast imaging for real-time visualization of cerebral blood flow in cerebrovascular surgery: results from pre-clinical studies [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 7614.
- [8] WU C, LIU J J, HUANG X, *et al.* Non-line-of-sight imaging over 1.43 km [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(10): e2024468118.
- [9] ZHU S, WANG C T, HUANG J Q, *et al.* Neuro-morphic encryption: combining speckle correlography and event data for enhanced security [J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2024, 3(5): 056002.
- [10] YANG M C, WANG P, WU Y, *et al.* A ghost imaging framework based on laser mode speckle pattern for underwater environments [J]. *Communications Engineering*, 2024, 3: 52.
- [11] ACEVEDO C H, DOGARIU A. Non-evolving spatial coherence function [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5761.
- [12] YE Z Y, UNIVERSITY B N, DING C X, *et al.*

- Vortex memory effect of light for scattering-assisted massive data transmission[J]. *Optica*, 2025, 12(2): 281.
- [13] MA R, UNIVERSITY S, LUO K H, *et al.* Orbital-angular-momentum-dependent speckles for spatial mode sorting and demultiplexing[J]. *Optica*, 2024, 11(5): 595.
- [14] VOELKEL R, WEIBLE K J. Laser beam homogenizing: limitations and constraints [J]. *Optical Fabrication, Testing, and Metrology III*, 2008, 7102: 71020J.
- [15] STANGNER T, ZHANG H Q, DAHLBERG T, *et al.* Step-by-step guide to reduce spatial coherence of laser light using a rotating ground glass diffuser[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(19): 5427.
- [16] LIU Y, ZHU J P, CHEN C, *et al.* Irradiance-tailoring integral-illumination polarization homogenizer based on anamorphic aspheric microlens arrays [J]. *Optics Express*, 2024, 32(15): 26609.
- [17] VAN GIEL B. Using a fly's eye integrator in efficient illumination engines with multiple light-emitting diode light sources [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(4): 043001.
- [18] PAN J W, WANG C M, LAN H C, *et al.* Homogenized LED-illumination using microlens arrays for a pocket-sized projector [J]. *Optics Express*, 2007, 15(17): 10483.
- [19] JIN Y H, HASSAN A, JIANG Y J. Freeform microlens array homogenizer for excimer laser beam shaping [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 24846.
- [20] KÖHLER A. A new system of illumination for photomicrographic purposes[J]. *Zeitschrift für wissenschaftl Mikroskopie und mikroskopische Technik*, 1893, 10: 433-440.
- [21] 朱晓萌, 高万荣, 朱越. 使用改进型科勒照明系统的全场光学相干层析成像系统[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0511002.
- ZHU X M, GAO W R, ZHU Y. Improved Kohler illumination-based full-field optical coherence tomography system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0511002. (in Chinese)
- [22] 隋成华, 沃圣杰, 徐丹阳, 等. 裂隙灯显微镜照明系统的设计与实现[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 722001.
- SUI CH H, WO SH J, XU D Y, *et al.* Design and implementation of illumination system for slit-lamp microscope [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 722001. (in Chinese)
- [23] 王起, 张国芳. 基于同轴柯勒照明的大变倍比紧凑型显微镜设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(4): 921-931.
- WANG Q, ZHANG G F. Design of large zoom ratio compact microscope based on coaxial Kohler illumination [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 921-931. (in Chinese)
- [24] LI Y, KNÖCHELMANN M, LACHMAYER R. Beam pre-shaping methods using lenslet arrays for area-based high-resolution vehicle headlamp systems[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(13): 4569.
- [25] IBRAHIM K A, MAHECIC D, MANLEY S. Characterization of flat-fielding systems for quantitative microscopy [J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 22036.
- [26] 柴常春, 闫红洲, 罗健, 等. 结构光照明显微镜照明系统的设计与仿真[J]. *工具技术*, 2019, 53(7): 99-102.
- CHAI CH CH, YAN H ZH, LUO J, *et al.* Design and simulation of illumination system for structured illumination microscope [J]. *Tool Engineering*, 2019, 53(7): 99-102. (in Chinese)
- [27] 于丽娜. 一种实现柯勒照明的高功率LED同轴光设计[J]. *电子工业专用设备*, 2010, 39(11): 27-30.
- YU L N. The design of co-axial lighting for Kohler illumination with high power LED [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2010, 39(11): 27-30. (in Chinese)
- [28] 宋菲君, 陈笑, 刘畅. 近代光学系统设计概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- SONG F J, CHEN X, LIU CH. *Introduction to Modern Optical System Design* [M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)
- [29] 赵慧芳. 投影机性能指标测试系统和测试方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- ZHAO H F. *Research on Performance Evaluation System and Testing Methods for Projectors* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)

[30] GOODMAN J W. *Statistical Optics* [M]. John Wiley & Sons Inc, 2015.

[31] YANG W Q, SITU G H. Recovery of the topo-

logical charge of a vortex beam propagated through a scattering layer [J]. *Applied Optics*, 2021, 60 (10): B95.

作者简介:



杨如诗(2002—),女,广东梅州人,硕士研究生,2025年于中山大学获得学士学位,现为中山大学理学院硕士研究生,主要研究方向为光学设计。E-mail: yangrsh@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者:



杨黎(1981—),男,深圳职业技术大学副教授,主要从事电子及光电子信息技术相关领域的研究。E-mail: yangli@szpu.edu.cn

通讯作者:



蒋先涛(1987—),男,中山大学副教授,硕士生导师,主要从事飞秒激光及光学成像相关领域的研究。E-mail: jiangxt27@mail.sysu.edu.cn