

相干和非相干光源对贝塞尔光束成像系统分辨率的影响

何艳林 陈姿言 吴逢铁

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 研究了在无衍射光束成像过程中,相干和非相干光源对成像系统分辨率的影响。对于衍射受限的成像系统,利用衍射积分理论与傅里叶光学理论导出成像系统的点扩展函数(PSF)公式,对不同的PSF进行模拟比较,结果表明非相干光源下的PSF更加集中,成像质量更好。分别采用波长为632.8 nm的He-Ne激光相干光和中心波长458.5 nm、半峰全宽24.5 nm的蓝光发光二极管(LED)非相干光作为光源进行实验,并利用Zemax软件进行模拟。对比实验结果与数值模拟仿真结果:非相干光源下所成的条纹像粗细更加均匀清晰,分辨率更高。实验结果与理论分析及数值仿真模拟结果相吻合。

关键词 相干光学;分辨率;相干光;非相干光;无衍射贝塞尔光束

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.090301

Effects of Coherent and Incoherent Light Sources on Resolution of Bessel Beam Imaging System

He Yanlin Chen Ziyang Wu Fengtie

Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract The effects of the coherent and incoherent light sources on the resolution of imaging system are studied in the process of non-diffracting beam imaging. In the limited diffraction imaging system, the formula of point spread function (PSF) of the imaging system is derived by the diffraction integral theory and Fourier optical theory. By simulating and comparing the different PSFs, it is found that the PSF is more concentrated and the imaging quality is better under the condition of incoherent light sources. He-Ne laser coherent light with the wavelength of 632.8 nm and incoherent light of blue light LED with the center wavelength of 458.5 nm and full width at half-maximum of 24.5 nm are used for experiment as light source, and Zemax software is used to simulate. Comparing the experimental and the numerical simulation results, the thickness of the stripes image of incoherent source is more uniform, clearer and its resolution is higher. The experimental results are consistent with theoretical analysis and numerical simulation results.

Key words coherence optics; resolution; coherent light; incoherent light; non-diffracting Bessel beam

OCIS codes 030.1670; 110.3000; 330.6130

1 引言

普通成像系统一般利用凸透镜成像,由于受到光的衍射作用,只能在与物面共轭的像面上成清晰的像,这样在观察时就需不断调焦。为克服以上缺点,Durnin^[1]首先提出了“无衍射光束”概念,这种特殊光束中心

收稿日期:2016-05-09;收到修改稿日期:2016-06-06;网络出版日期:2016-08-30

基金项目:国家自然科学基金(61178015)、福建省科技重大项目(2016H6016)、泉州市科技重点项目(2014Z127)

作者简介:何艳林(1991—),女,硕士研究生,主要从事光束传输与变换方面的研究。E-mail: 1066546728@qq.com

导师简介:吴逢铁(1958—),男,博士,教授,主要从事光束传输与变换,短脉冲技术及非线性光学等方面的研究。

E-mail: fengtie@hqu.edu.cn(通信联系人)

光斑小(中心光斑半径仅在微米量级)、光强大,在一定传播距离内中心不发散,具有线聚焦特性,且遇到障碍物会自重建^[2],在应用于成像^[3]时有效增大了景深。此外,无衍射光束在精密测量^[4-5]、粒子的光学引导^[6]和光学相干断层扫描(OCT)^[7]等方面也得到了广泛应用,特别是 Snoeyink^[8]在2013年提出的贝塞尔光束显微镜(BBM),利用轴棱锥产生的贝塞尔光束改变了系统的数值孔径,将显微镜的成像分辨率提高了约三分之一,这将无衍射贝塞尔光束的应用推广到了新的领域。

李攀等^[9]在研究基于多模光纤产生局域空心光束时,发现由于发光二极管(LED)光源的非相干性,光束通过光纤和透镜后几乎没有干涉效应,观测到的光斑辐照均匀性比完全相干的激光光源更好,利用LED光源获得的空心光束均匀性更好,更平滑。杜团结等^[10-11]研究不同光源产生贝塞尔光束时发现,LED产生的贝塞尔光束由于相干性差,外围变得模糊,但对中心几环影响不大,比激光产生的贝塞尔光束效果好,且频谱越宽的光源产生的贝塞尔光束亮暗环对比度和强度梯度越低。对于无衍射光束成像系统,选取合适的光源提供照明非常重要,基于前期的研究,相干光源(激光)和非相干光源(LED)均能通过轴棱锥产生近似贝塞尔光束^[11-12],而在应用于光学成像时,哪种光源提高成像系统分辨率的效果更好,目前并没有相关研究。

本文在以往对无衍射光束研究的基础上,分别利用相干光源(激光)和非相干光源(LED)对条纹状物体进行成像研究,使用Zemax软件进行仿真模拟,并设计相关实验进行验证。实验结果与理论分析及仿真模拟一致,结果表明:在提高无衍射光束成像系统的分辨率上,非相干光源的效果更优于相干光源。

2 理论分析

2.1 系统的点扩展函数

点扩展函数(PSF)^[13-14]把物体看成发光点的集合,并以一点成像时的能量集中程度来评价光学系统的成像质量。在线性系统中,物像关系可以表示为: $I_g = l_i \cdot h$,这个卷积系数 h 就是PSF,因为点光源为冲激函数,所以 $I_g = h$ 。也就是说 I_g 的质量取决于 h 。当 h 越偏离冲激函数,即 h 越宽, I_g 就越模糊;反之, h 越集中, I_g 就越清晰,即PSF的宽度决定了重建图像的空间分辨率。对于衍射受限的成像系统,PSF就是计算夫琅禾费衍射积分的值。

在进行系统的PSF分析之前,首先分析轴棱锥的特性,方便之后公式的推导使用。

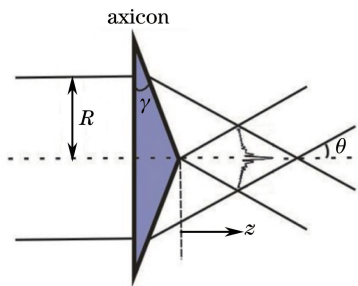


图1 轴棱锥示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the axicon

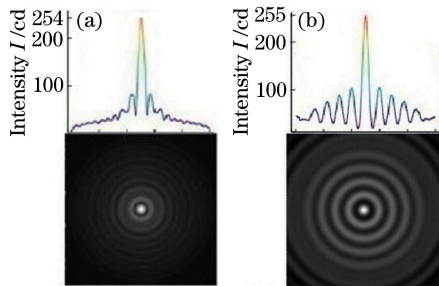


图2 不同光源下PSF分布。

(a)蓝光LED;(b)He-Ne激光

Fig. 2 Distribution of PSF under different light sources. (a) Blue LED; (b) He-Ne laser

轴棱锥具有线聚焦特性,轴棱锥法产生贝塞尔光束具有结构简单、转换效率高、光损伤阈值高的优点。根据几何光学的基本定律可知,半径为 R 的平行光入射轴棱锥时,出射光束的会聚角为 $\theta \approx (n-1) \cdot \gamma$,所以有

$$z_{\max} \approx \frac{R}{\theta} = \frac{R}{(n-1) \cdot \gamma}, \quad (1)$$

式中 z_{\max} 为最大无衍射距离, γ 为轴棱锥底角。当 $R=2\text{ mm}$, $\gamma=1^\circ$, $n=1.46$ 时, $z_{\max}=24.9\text{ cm}$ 。

在无衍射光成像系统中,轴棱锥仅改变成像系统的相位。轴棱锥的振幅透射率函数^[15]为

$$t(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma r], \quad (2)$$

式中 r 为径向距离, $k=2\pi/\lambda$ 为波数。

下面将分别导出相干光源和非相干光源照明下的 PSF。

将轴棱锥加入到衍射受限的成像系统中,当观察面位于离焦面时,产生波像差,定义离焦参数为 φ ,则系统的广义光瞳函数可以写成

$$P(x, y, \varphi) = Q(x, y)t(r)\exp\left(i\varphi \frac{x^2 + y^2}{R^2}\right), \quad (3)$$

式中 $Q(x, y)$ 为原光瞳函数,在光瞳内为 1,光瞳外为 0。

按照傅里叶光学理论,在衍射受限的系统中,系统的 PSF 为孔径光瞳的夫琅禾费衍射,则轴上点光源的 PSF 为

$$\begin{aligned} h(x_1, y_1, \varphi) &= \frac{A}{\lambda d_0} \iint P(x, y, \varphi) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda d_0}(xx_1 + yy_1)\right] dx dy = \\ &\iint \exp\left[\frac{-ik(n-1)\gamma D}{2} \sqrt{x^2 + y^2}\right] \exp\left(i\varphi \frac{x^2 + y^2}{R^2}\right) \times \\ &\exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda d_0}(xx_1 + yy_1)\right] dx dy, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 A 为常数振幅, D 为轴棱锥直径, d_0 为出瞳到像面的距离,将上式转化为极坐标系下的圆对称系统,令 $x = \rho \cos \alpha, y = \rho \sin \alpha, x_1 = \rho_1 \cos \beta, y_1 = \rho_1 \sin \beta$, 忽略常系数,则(4)式可以写为

$$h(\rho_1, \varphi) = \int \rho \exp\left[\frac{-ik(n-1)\gamma D}{2} \rho + i\varphi \frac{\rho^2}{R^2}\right] d\rho \int_0^{2\pi} \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda d_0} \rho \rho_1 \cos(\alpha - \beta)\right] d\alpha. \quad (5)$$

又有贝塞尔恒等式

$$\int_0^{2\pi} \exp[ia \cos(\alpha - \beta)] d\alpha = 2\pi J_0(a), \quad (6)$$

则(4)式进一步简化为

$$h(\rho_1, \varphi) = 2\pi \int \rho J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda d_0} \rho \rho_1\right) \exp\left[\frac{-ik(n-1)\gamma D}{2} \rho + i\varphi \frac{\rho^2}{R^2}\right] d\rho. \quad (7)$$

采用稳相法近似计算得

$$h(\rho_1, \varphi) \approx 2\pi \sqrt{\frac{\pi}{|\varphi|}} \rho_s J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda d_0} \rho_s \rho_1\right) \exp\left[\frac{-ik(n-1)\gamma D}{2} \rho_s + i\varphi \frac{\rho_s^2}{R^2}\right], \quad (8)$$

式中 $\rho_s = \frac{k(n-1)\theta D}{4\varphi}$ 。

在非相干光源照明下,强度脉冲响应是相干脉冲响应模的平方,即非相干光源成像系统的 PSF 为

$$h_1(x, y, \varphi) = |h(x, y, \varphi)|^2. \quad (9)$$

将(8)式代入(9)式,得到非相干光源下,无衍射光成像系统的 PSF

$$h_1(\rho_1, \varphi) \approx \frac{4\pi^3}{|\varphi|^2} \rho_s^2 J_0^2\left(\frac{2\pi}{\lambda d_0} \rho_s \rho_1\right) = \frac{4\pi^3}{|kW_{20}|} \rho_s^2 J_0^2\left[\frac{k(n-1)\gamma D}{d_0 W_{20}} \rho_1\right], \quad (10)$$

式中 W_{20} 为孔径边缘产生的最大光程差。

PSF 就是光学系统的脉冲响应函数,光学系统所成的像可以看作是成像物体与各点的 PSF 的卷积。经分析可知上述点光源的 PSF 为零阶贝塞尔分布^[11,16],按照图 1 所示,利用 Mathcad 软件模拟 632.8 nm 的 He-Ne 激光和中心波长 458.5 nm、半峰全宽 24.5 nm 的蓝光 LED 光源下的 PSF,如图 2 所示。可以看出,在非相干照明下,系统的 PSF 更加集中,成像质量更好。

2.2 无衍射光成像系统分辨率

观察轴棱锥的聚焦示意图(见图 1),不同 R 处的光线具有不同的像点位置,所以它能将平行光线连续地会聚到沿轴线不同的位置上,具有线聚焦特性。轴棱锥放在要成像的物体之后可以使物体聚焦成像,同时可以提高成像系统的分辨率,可根据瑞利判据进行具体分析。

根据衍射理论,无限远的物体经理想光学系统成像后,第一暗环半径对出瞳中心的张角为

$$\Delta\theta = 1.22\lambda/D. \quad (11)$$

设艾里斑的半径为 δ , 由于 $\Delta\theta$ 很小, 则成像系统的苛刻分辨率(1/2 波瓣的距离)为

$$\delta = 1.22(\lambda/D)f, \quad (12)$$

式中 D 为孔径, D/f 为相对孔径。

在显微系统中通常使用数值孔径(NA)表征, 所以上式可以写为

$$\delta = 0.61(\lambda/NA). \quad (13)$$

根据文献[8]可知, 轴棱锥应用于成像系统可以改变系统的数值孔径, 理想的无衍射贝塞尔光束成像系统的分辨率为

$$\delta' = 0.3828 \frac{\lambda}{NA}. \quad (14)$$

对比(13)式和(14)式知, 成像分辨率提高了约三分之一, 且随着波长的增大, 分辨率会降低, 拓展了无衍射光束的应用。

3 光路设计与仿真模拟

用 Zemax 软件在非序列模式下设计光路, 模拟相干和非相干光源对成像系统分辨率的影响, 使用底角为 1° 的轴棱锥, 材料为 FK3, 成像物体为间隔 0.1 mm, 宽度 0.1 mm 的不透光矩形条纹, 光路图及成像物体如图 3 和图 4 所示。

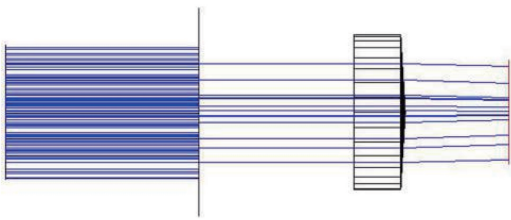


图 3 无衍射成像系统模拟图
Fig. 3 Simulated diagram of non-diffracting imaging system

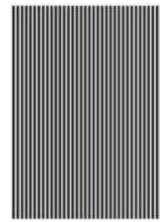


图 4 成像物体
Fig. 4 Imaging object

在轴棱锥后同一位置(无衍射距离内)观察, 分别得到光源为蓝光 LED 和 He-Ne 激光时的成像接收面截面图, 如图 5 所示。

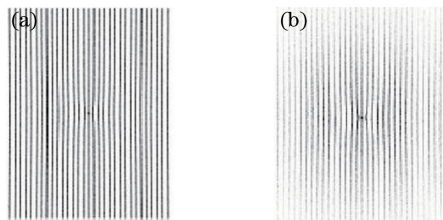


图 5 不同光源下接收面截面光强图。(a)蓝光 LED;(b)He-Ne 激光

Fig. 5 Cross section light intensity of the receiving surface under different light sources. (a) Blue LED; (b) He-Ne laser

在图 5 中, 由于轴棱锥的影响, 图像中心会有一个亮点, 但条纹状物体并没有受中心亮点影响, 观察可知用 LED 作为光源时成像的条纹密集、粗细更加均匀, 明显比激光作为光源时分辨率高, 成像质量更好。在 Zemax 软件序列模式下构建与图 3 中一样的光路, 模拟此系统的调制传递函数(MTF)曲线和衍射环能量分布, 如图 6 和图 7 所示。

MTF 反应光学系统对物体不同频率成分的传递能力, 与光学系统的衍射效果有关, 是评价光学系统成像质量的主要方法, 图 6 中的 MTF 曲线, 纵坐标表示对比度, 当对比度为 1 时图像最清晰, 横坐标表示分辨率, 用每毫米的线对数表示, 每毫米可以分辨的线对数越多表示分辨率越高, 用像空间每毫米的线对数表示 MTF 曲线的空间频率刻度, 蓝色实线(TS 0.00 mm)表示的是 MTF 截止频率, 当系统的截止频率接近为 0

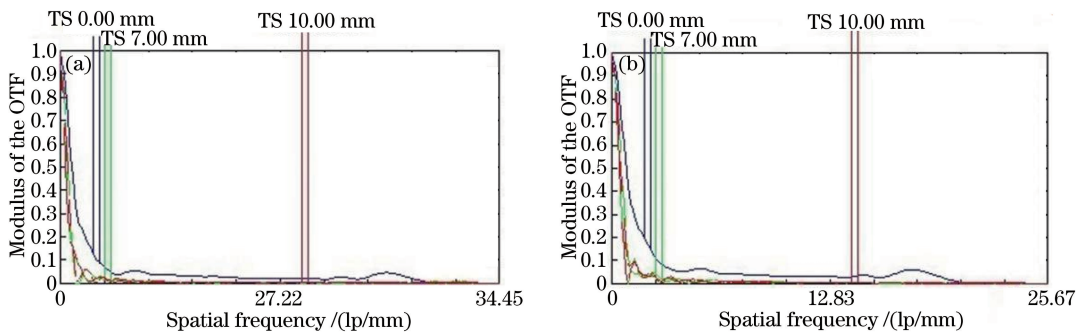


图 6 不同光源下 MTF 曲线。(a) 蓝光 LED; (b) He-Ne 激光

Fig. 6 MTF curves under different light source. (a) Blue LED; (b) He-Ne laser

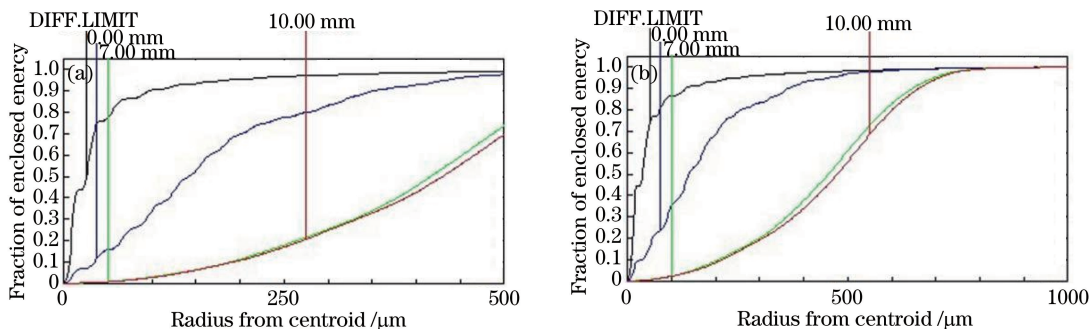


图 7 不同光源下能量包容图。(a) 蓝光 LED; (b) He-Ne 激光

Fig. 7 Diffraction encircled energy under different light sources. (a) Blue LED; (b) He-Ne laser

时,就会达到分辨极限,对比度为 0。LED 为光源时,成像系统的截止频率达到了 29.33 lp/mm,高于激光为光源时的截止频率 20.42 lp/mm,则系统的分辨率更高,成像质量更好。

衍射极限曲线(黑色实线,DIFF. LIMIT)是轴上无像差的包围圆能量分布,横坐标为以像点为中心的包容圆的半径,使用惠更斯衍射极限,从能量包容图中可以看出,在 LED 作为光源时,衍射极限曲线更加平缓,则能量分布均匀性更好,更利于成像。

4 实验结果与分析

根据以上模拟条件,在实验室光学平台上搭建光路,如图 8 所示,光源分别为波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光和主波长 458.5 nm、半峰全宽 24.5 nm 的蓝光 LED(如图 9 所示),望远镜扩束系统 L1 和 L2 焦距分别为 $f_1=15\text{ mm}$ 、 $f_2=190\text{ mm}$,L2 与光阑的距离 $g=11\text{ cm}$,成像物体与光阑和轴棱锥相距 h,s 均为 10 cm,光源发出的光束首先通过偏振片以调试合适的光强便于观察,然后经望远镜扩束系统和光阑使光束变为平面波均匀照射到要成像的物体上,物体使用的是宽度 0.1 mm,间隔 0.1 mm 的不透光矩形条纹,最后光束入射到底角为 1° 的轴棱锥上。

假设轴棱锥顶点为 z 轴零点,将体式显微镜(目镜放大倍数为 $10\times$ 倍,物镜放大倍数分别为 $30\times, 40\times, 50\times$)

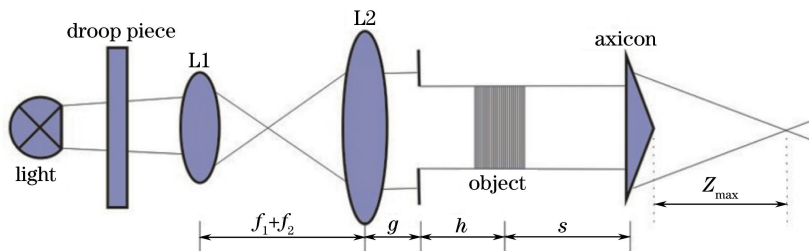


图 8 实验装置图

Fig. 8 Experimental setup

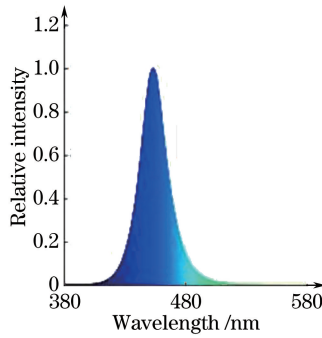


图9 蓝光LED频谱图

Fig. 9 Spectrum charts of the blue LED

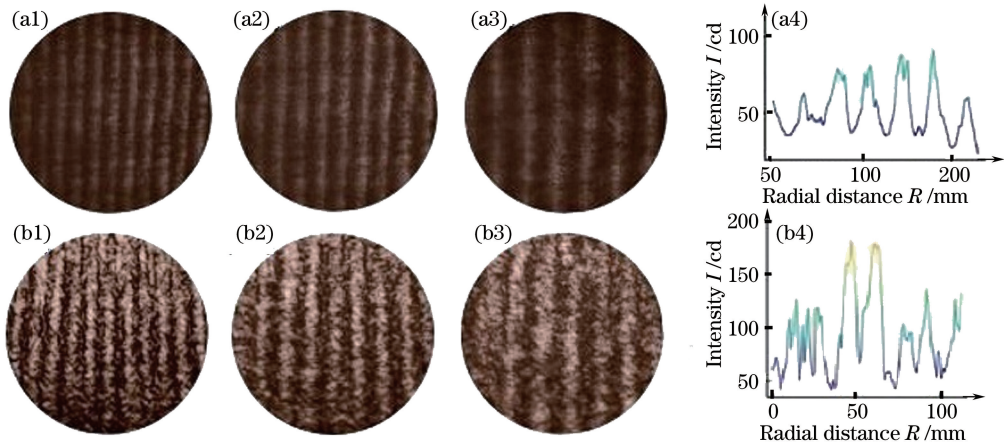


图10 (a1)~(a3)激光光源下放大率分别为 $300\times$ 、 $400\times$ 、 $500\times$ 的截面光强分布图和(a4)500 \times 的径向光强分布图；

(b1)~(b3)蓝光LED光源下放大率分别为 $300\times$ 、 $400\times$ 和 $500\times$ 的截面光强分布图和(b4)500 \times 的径向光强分布图

Fig. 10 (a1)-(a3) Cross-section light intensity distribution with magnification of $300\times$ 、 $400\times$ 、 $500\times$ and (a4) radial light intensity distribution with magnification of $500\times$ under laser source; (b1)-(b3) cross-section light intensity distribution with magnification of $300\times$ 、 $400\times$ 、 $500\times$ and (b4) radial light intensity distribution with magnification of $500\times$ under blue LED source

放在 $z=14.5$ cm处观察截面图,并将像面分别放大 $300\times$ 、 $400\times$ 、 $500\times$,利用自带数码相机分别拍摄截面光强分布图,图10(a1)~(a3)分别为激光光源下,放大 $300\times$ 、 $400\times$ 和 $500\times$ 的截面光强分布图;图10(b1)~(b3)分别为蓝光LED光源下,放大 $300\times$ 、 $400\times$ 、 $500\times$ 的截面光强分布图。将放大500 \times 的图片导入Mathcad软件中,绘制出相对应的径向光强分布图,如图10(a4)、(b4)所示。

观察图像可得,激光作为光源时:由于相干性太强,光束通过轴棱锥后发生强烈的干涉效应,所成像的条纹强度不均匀,间隔不明显,当放大到500 \times 时,可以看到亮条纹之间明显的粘连,成像质量差,分辨率低。LED作为光源时:亮暗条纹直且均匀,放大到500 \times 时依然清晰,间隔明显,分辨率高。对比图像放大到500 \times 时的径向光强分布图,现象更加直观,LED光源成像系统分辨率优于激光光源成像系统。

5 结论

基于前期研究,相干光源(激光)和非相干光源(LED)均能通过轴棱锥法产生无衍射光束,且轴棱锥应用于成像系统中可以提高成像系统分辨率,分析了光源对成像系统分辨率的影响。首先,利用衍射积分理论与傅里叶光学理论推导出成像系统的PSF,并模拟比较了不同光源下的PSF,结果显示非相干光源下的PSF更加集中,成像质量更好。其次,设计实验装置并分别采用632.8 nm的He-Ne激光和中心波长458.5 nm、半峰全宽24.5 nm的蓝光LED作为光源,经扩束系统后成为平面波入射到物体和轴棱锥上,在轴棱锥后观察截面光强,依照模拟条件在实验室光学平台上进行实验,对比实验结果与Zemax软件的模拟仿真结果,得到在提高无衍射光束成像系统分辨率上,非相干光源的效果更优于相干光源。实验结果、理论分析及仿真模

拟相符。该研究结果对无衍射光束应用于成像方面具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 Durnin J, Miceli J, Jr, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(15): 1499-1501.
- 2 He Xi, Wu Fengtie, Li Pan, *et al.* Self-reconstruction of high-order Bessel beams generated by green LED light source [J]. Scientia Sinica, 2015, 45(1): 014202.
何 西, 吴逢铁, 李 攀, 等. 绿光 LED 产生高阶 Bessel 光的自再现[J]. 中国科学, 2015, 45(1): 014202.
- 3 Meng H, Xiang B, Zhang J, *et al.* The generation of Bessel beam and its application in millimeter wave imaging [J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2014, 35(2): 208-217.
- 4 Ma G, Liu L, Zhao B. Nondiffracting beam based technology for an attitude measurement system for automatic orientation of shield [J]. Optical Engineering, 2015, 54(11): 114106.
- 5 Ma Guolu, Zeng Guoying. Research and uncertainty analysis of probe based on non-diffracting beam for measuring coordinates [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0512005.
马国鹭, 曾国英. 基于无衍射探针的空间坐标测量及其不确定度分析 [J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0512005.
- 6 Summers M D, Reid J P, McGloin D. Optical guiding of aerosol drop droplets [J]. Optics Express, 2006, 14(14): 6373-6380.
- 7 Ding Z H, Ren H W, Zhao Y H, *et al.* High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens [J]. Optics Letters, 2002, 27(4): 243-245.
- 8 Snoeyink C. Imaging performance of Bessel beam microscopy [J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2550-2553.
- 9 Li Pan, Zhu Qingzhi, Wu Fengtie. Hollow beam generated by incoherent light source and multimode fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0422004.
李 攀, 朱清智, 吴逢铁. 利用非相干光源基于多模光纤获得空心光束 [J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0422004.
- 10 Du Tuanjie, Wang Tao, Cheng Zhiming, *et al.* Influence of source spectral width on gradient between bright and dark rings of Bessel beams [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2013, 25(4): 817-821.
杜团结, 王 涛, 程治明, 等. 光源频谱宽度对 Bessel 光束亮暗梯度的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(4): 817-821.
- 11 Cheng Zhiming, Wu Fengtie, Fan Dandan, *et al.* Non-diffraction Bessel-like beam generated by green LED source [J]. Scientia Sinica, 2012, 42(8): 805-811.
程治明, 吴逢铁, 范丹丹, 等. 绿光 LED 产生无衍射 Bessel 光束 [J]. 中国科学, 2012, 42(8): 805-811.
- 12 Du Tuanjie, Wang Tao, Wu Fengtie. Line focusing characteristics of axicon illuminated by non-diffracting Bessel beam [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(13): 134103.
杜团结, 王 涛, 吴逢铁. 轴棱锥对无衍射光束的线聚焦特性 [J]. 物理学报, 2013, 62(13): 134103.
- 13 Feng B, Shi Z L, Zhang C S, *et al.* Analytical model for effect of temperature variation on PSF consistency in wavefront coding infrared imaging system [J]. Optics Communications, 2016, 367: 35-43.
- 14 Wang Huaying, Wang Guangjun, Zhao Jie, *et al.* Resolution analysis of imaging system with pre-magnification digital holography [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(4): 729-733.
王华英, 王广俊, 赵 洁, 等. 预放大数字全息系统的成像分辨率分析 [J]. 光子学报, 2008, 37(4): 729-733.
- 15 Bialic E, Louis J. Multiple annular linear diffractive axicons [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(4): 523-33.
- 16 Wu Fengtie, Zhang Qian'an, Zheng Weitao. Generating long-distance nondiffracting Bessel beams with equivalent axicon [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1202004.
吴逢铁, 张前安, 郑维涛. 等效轴棱锥产生长距离无衍射贝塞尔光束 [J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202004.