

散斑自相关分辨率测量和修正

罗诗淇 刘京宙 陈炫辉 谢向生

Speckle autocorrelation resolution measurement and correction

LUO Shiqi, LIU Jingzhou, CHEN Xuanhui, XIE Xiangsheng

引用本文:

罗诗淇, 刘京宙, 陈炫辉, 等. 散斑自相关分辨率测量和修正[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 398–405. DOI: 10.5768/JAO202344.0203006

LUO Shiqi, LIU Jingzhou, CHEN Xuanhui, et al. Speckle autocorrelation resolution measurement and correction[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 398–405. DOI: 10.5768/JAO202344.0203006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0203006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

放疗3D剂量验证系统中光场相机点扩散函数获取

Point spread function acquisition of light field camera in 3D dose verification system for radiotherapy

应用光学. 2021, 42(1): 43–48 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101007>

基于离轴数字全息改善散斑自相关重建效果

Improving effect of speckle autocorrelation reconstruction based on off-axis digital holography

应用光学. 2021, 42(2): 262–267 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0202002>

应用数字散斑投影测量纸页厚度

Apply of digital speckle projection in measurement of paper sheet thickness

应用光学. 2019, 40(5): 847–852 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0503002>

基于数字散斑相关法的双金属复层板应变光学检测问题研究

Strain optical detection technology applied for bi-metal clad plate using digital speckle correlation method

应用光学. 2018, 39(6): 873–879 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0603004>

基于物体像的干涉条纹图像中散斑噪声的识别方法

Recognition method of speckle noise in interference fringe images based on object

应用光学. 2017, 38(2): 221–226 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0202003>

数字散斑亚像素小角位移测量的曲面拟合法

Curved surface fitting method of sub-pixel small angle measurement

应用光学. 2017, 38(2): 256–263 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0203002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0398-08

散斑自相关分辨率测量和修正

罗诗淇, 刘京宙, 陈炫辉, 谢向生

(汕头大学 理学院物理系, 广东 汕头 515063)

摘要: 散斑相关是许多基于散斑的光学测量和成像技术的基础, 决定了光学系统的分辨率。当前散斑尺寸 (颗粒度或分辨率) 的理论描述不够精确, 也缺乏实验验证。探究了散斑图样自相关尺寸的影响因素, 与相同数值孔径物镜聚焦进行对比, 揭示薄散射介质的“散射透镜”性质。通过散斑自相关和透镜聚焦尺寸的多组测量, 结果表明, 截趾函数会影响其分辨率, 需要根据具体光路对阿贝判据做修正。对基于散斑的测量和成像技术具有一定的参考价值。

关键词: 散斑相关; 阿贝判据; 散射透镜; 点扩散函数

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0203006

Speckle autocorrelation resolution measurement and correction

LUO Shiqi, LIU Jingzhou, CHEN Xuanhui, XIE Xiangsheng

(Department of Physics, College of Science, Shantou University, Shantou 515063, China)

Abstract: Speckle correlation is the basis of speckle-based optical measurements and imaging recovery technologies, which determines the resolution of the optical system. At present, the theoretical description of speckle size (granularity or resolution) is not accurate enough and lacks of experimental verification. The influencing factors of speckle pattern autocorrelation size were explored, compared it with the same numerical aperture objective, and the scattering lens properties of thin scattering medium were revealed. Through the multiple sets of measurements for speckle autocorrelation and lens focusing size, the results show that the apodization function will affect the resolution, and the Abbe criterion needs to be corrected according to the specific optical path, which has a certain reference value for speckle-based measurement and imaging technology.

Key words: speckle correlation; Abbe criterion; scattering lens; point spread function

引言

“雾里看花花非花, 水中望月月非月”, 由于传输介质的影响, 日常生活中的很多事物看起来变得虚无缥缈、琢磨不透、可望不可及。光子在透过非均匀传输介质时, 会与介质颗粒相互作用, 改变了入射光场的信息, 出现传输方向变得随机化, 这种现象被称为“光的散射”。如何实现透过散射介质的光学成像是一项极具挑战且意义重大的课题^[1-3], 在医学诊断、军事国防和安全监控等领域都有着重要的应用价值。幸运的是, 光子被散射之后, 仍然包含着物体的信息, 人们可以通过多种先进光

学成像方法, 如波前整形^[4-5]、相位共轭^[6-8]、散射传输矩阵测量^[9-11]、散斑相关^[12-14]、散斑反卷积^[15-17]和基于深度学习的散斑恢复^[18]等, 对物场信息进行恢复。近期, 科学家又提出各种新技术并应用到不同的成像环境中, 包括物体位置盲检测^[19]、超越3D光记忆效应 (optical memory effect, OME) 的多目标成像^[20]、基于参考物体辅助的成像^[21]、在强散射随机介质内部运动的物体定位成像^[22]、基于散斑照明的傅里叶域浴帘效应^[23]及其成像距离修正^[24]。以上克服散射介质影响的恢复成像技术大多依赖于散斑的探测和分析^[25-26]。此外, 不少传统光学测

收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金 (12074444); 广东省基础与应用基础研究基金 (2021A151501205)

作者简介: 罗诗淇 (2001—), 女, 主要从事散射成像方面的研究。E-mail: 19sqliuo@stu.edu.cn

通信作者: 谢向生 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事散射成像和矢量光场共聚焦成像技术研究。E-mail: xxs@stu.edu.cn

量技术也是利用散斑的测量和计算处理,在近期也取得很好的应用扩展。比如散斑照相术通过可以测量透明介质的折射率^[27],数字散斑相关法可以获得位移和应变信息^[28],散斑投影技术在制导武器中^[29]和纸张厚度检测方面^[30]也有重要应用。然而,无论是在克服散射影响的成像恢复还是在光学计量上,系统的光学分辨率仅仅沿用笼统的 $0.61\lambda/NA$ ^[30](NA 为数值孔径)来表述,其描述为散斑颗粒度、散斑尺寸或散斑相关成像分辨率,在不同应用场合采用不同的名称。而这个分辨率公式是在理想和简化的情况下得到的,我们曾经证明了在成像应用上其数值受到物距影响^[31]。本论文通过理论修正和实验验证,证明散斑的分辨率(颗粒度尺寸)与透镜聚焦斑具有很好的类比性,在忽略像差影响下,分辨率公式需要针对入射光场空间分布和数值孔径进行修正。

1 测量原理与方法

1.1 透镜聚焦特性

一个物点通过成像系统后,成为一个弥散斑,我们把这个定义为系统的点扩散函数,也叫系统的脉冲响应函数。即使在物像差的成像系统中,人们也无法获得理想成像,因为成像系统收到有限光阑空间的限制,也称为衍射受限,在此情况下,圆形孔径光阑的成像系统点扩散函数表现为爱丽斑,数学上是贝塞尔函数除以坐标。阿贝将爱丽斑的半高全宽定义为系统的分辨率 R_i ,称为阿贝判据 $R_i = 0.51\lambda/NA$,瑞利判据定义为2个点扩散函数的峰值刚好落在另外一个的第一零点处,称为刚好可以被分辨, $R_i = 0.61\lambda/NA$ 。然而爱丽斑仅仅是在理想入射光场情况下获得的,也就是假设入射光场是平面波,而且透镜聚焦是傍轴近似下进行。描述光场聚焦更加严格的公式是矢量衍射理论,被高 NA 透镜聚焦时,光场传输不再满足近轴近似条件,因此采用Richards-Wolf矢量衍射理论^[32-33]对紧聚焦场表达式进行严格推导。

$$E(\rho, \phi, z) = \frac{f e^{-ikf}}{i\lambda} \iint_{\Omega} \mathcal{E}(\theta, \varphi) e^{ikz \cos \theta} \times e^{ik\rho \sin \theta \cos(\phi - \varphi)} \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1)$$

式中: Ω 为透镜收集的立体角范围,可以通过调整环形光阑改变角度 θ 的积分区间;主要从事散射成像方面的研究。 $\mathcal{E}(\theta, \varphi)$ 是孔径函数,可以描述入射光场的振幅、偏振和相位等空间多参量调控下复合分布。公式(1)的推导过程需要利用消球差透镜

的正弦条件和强度法则^[32, 34]。

对于单个透镜,物平面中轴上点源在像平面上产生一个艾里斑PSF(point spread function, 点扩散函数)。其中 NA 是透镜的数值孔径, M 是放大倍数。Rayleigh标准指出,系统分辨率与PSF的第一个零点位置相关,零点可由焦场分布公式推导出。横向偏移光轴距离为 Δx 时,傍轴PSF出现零点,即为横向分辨率。

$$\Delta x = 0.6098 \frac{M\lambda}{NA} \quad (2)$$

1.2 散射透镜的光场特性

由于散射成像是基于散斑的相关性来实现,散射透镜的成像分辨率等价于散斑的颗粒度或散斑自相关的半高全宽,即自相关曲线从峰值下降到一半时横坐标的间距。基于光学记忆效应,散射介质有与普通透镜一样的特性,称为“散射透镜”^[35],因此也可用点扩展函数描述其光场传递性能。如图1所示是基于相位补充的散射体后聚焦,它能反映散斑颗粒度和散射成像分辨率的关联。平面波通过薄散射介质后将形成空间杂乱无章的散斑,如果能获得薄散射体的波场畸变信息,可以通过波前调制提前产生补偿相位和透镜相位,使得通过薄散射介质后的光场实现聚焦。此时散斑颗粒度尺寸与波前修正汇聚斑尺寸一致,也与散斑自相关尺寸一致。此外,利用散斑自相关的方法^[12-13]可以通过迭代算法恢复物体的成像,成像分辨率取决于散斑的颗粒度,也就是散斑自相关的尺寸。Goodman在统计散斑光场中提出如下假设^[36]:散射光场假设基元之间互不关联,相位 ϕ_n 在 $(-\pi, +\pi)$ 中均匀分布。

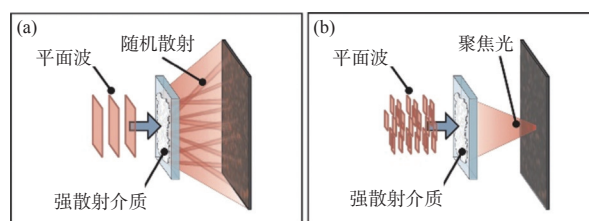


图1 波前调制实现薄散射介质后的聚焦

Fig. 1 Focussing of wavefront modulation after achieving thin scattering medium

基于以上2个假设,则光场中某点光强为 I 的概率为

$$P(I) = \frac{1}{\bar{I}} \exp\left(-\frac{I}{\bar{I}}\right) \quad (3)$$

式中: $\bar{I}$ 为光场的平均光强。这种强度满足负指数分布散射光场,称为完全态散射光场(fully developed

speckle), 振幅服从瑞利统计分布。下文散射光场的性质都是在完全态散射光场的条件下讨论的。基于菲涅尔衍射积分公式对散射介质出射到屏上光场进行推导。由此得散斑光场:

$$A(x, y) = \frac{e^{ikz}}{j\lambda z} e^{j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \int \int_{-\infty}^{\infty} a(\alpha, \beta) e^{j\frac{k}{2z}(\alpha^2+\beta^2)} e^{-j\frac{k}{\lambda z}(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta \quad (4)$$

基于公式(4), 有假设散射介质后表面照明尺寸为长度 L 的正方形区域, 则其自相关可以表示为

$$\Gamma_{lr}(\Delta x, \Delta y) = \bar{I}^2 \left[1 + \sin^2 \left(\frac{L\Delta x}{\lambda z} \right) \sin^2 \left(\frac{L\Delta y}{\lambda z} \right) \right] \quad (5)$$

假设散射介质后表面照明尺寸为直径 D 的圆形区域, 则其自相关可以表示为

$$\Gamma_{lc}(\Delta x, \Delta y) = \bar{I}^2 \left[1 + 2 \left| \frac{J_1 \left(\frac{\pi D r}{\lambda z} \right)}{\frac{\pi D r}{\lambda z}} \right|^2 \right] \quad (6)$$

式中: $r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$; J_1 为第一类贝塞尔函数, 且阶数为 1。

由图2可见, 透镜对平行相干光场聚焦形成的横向焦场和散射介质形成散斑的自相关具有几乎一致的形式(均匀背景常数的不同导致自相关曲线高度的略微不同)。散斑相关成像技术由散斑场的相关运算实现, 因此散射透镜的成像分辨能力等价于散斑自相关的半高全宽。此外, 现有理论模型将入射光场设定为理想的平面波, 未考虑光场本身激光光源强度孔径分布、孔径受限传播或光场调控造成的散斑颗粒度变化。

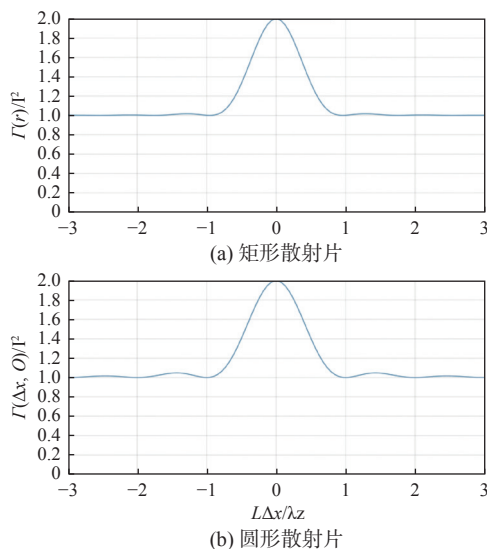


图2 散射片下散斑自相关曲线

Fig. 2 Speckle autocorrelation curves under scattering plates

2 测量装置组成

实验装置如图3所示。由于散射现象存在随机分布结果, 我们改变环形光阑的直径, 测量焦斑大小, 验证平行光光斑大小和分辨率的关系。实验采用高功率的氦氖激光器 ($\lambda=632.8$ nm, Thorlabs, HNL150 LB) 作为光源, 利用空间滤波器去除光束波面中的杂乱波面高频成分, 平凸透镜准直产生平行光, 并且放置不同直径的孔径光阑(直径 $d=17$ mm, $d=15$ mm, $d=12$ mm, $d=10$ mm, $d=8$ mm) 限制光斑的大小, 光斑通过散射介质(透镜或毛玻璃片)产生散斑(实验所用毛玻璃(GCL-201122)为单表面抛光结构, 粗糙面仅为毛玻璃表面, 其厚度对实验结果不造成影响), 使用 CMOS 探测器 (Thorlabs, CS2100M-USB, $5.04 \mu\text{m}/\text{pixel}$) 采集焦斑或散斑图像, 寻找看似杂乱的散斑中的光强信息。通过对光场的建模, 利用 matlab 软件编写对散斑图像进行自相关计算的程序, 运算后得到散斑自相关图像及半高全宽。光路示意图如下所示。根据散斑强度做自相关计算, 测得相应半高全宽的理论实际误差。

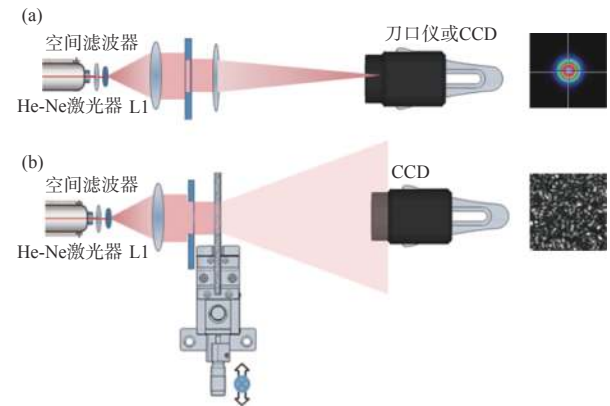


图3 透镜焦斑和散射体散斑测量光路

Fig. 3 Measurement optical path of lens focal spot and scatterer speckles

具体实验步骤如下:

a) 完成激光光束准直和扩束后在适合的位置放置聚焦透镜, 调节透镜的底座和镜座上的旋钮使聚焦透镜的中心落在光轴上并且平行光能刚好垂直入射聚焦透镜。

b) 在聚焦透镜的后方放置上位移台并装上刀口仪 (Thorlabs, BP209-VIS/M 光束质量分析仪, 双扫描狭缝, $200 \text{ nm} \sim 1100 \text{ nm}$, $\varnothing 2.5 \mu\text{m} \sim \varnothing 9 \text{ mm}$, 公制), 通过调整位移台的垂直和水平位置和俯仰使在电脑上焦斑中心刚好落在坐标轴的零点且在软

件上测量出的 x 轴和 y 轴的高斯半径相近。并沿纵向移动位移台或旋转纵向移动的旋钮使在软件中读取的 x 轴和 y 轴的高斯半径到最小。

c) 在聚焦透镜前方分别放上直径为 10 mm、12 mm、15 mm、17 mm、20 mm 小孔测量数据并导出计算, 分别与阿贝判据修正前和修正后的理论值比较。

图 4 为刀口仪捕获某一瞬时焦斑图像, 由于激光出射的光束呈高斯分布, 从图中可以看出激光的能量由中心向四周辐射衰减, 出射横截面为大体上呈现规则的圆形。

图 5 中, 1、2、3 行所用的光阑直径分别为 8 mm、12 mm、17 mm。1 至 4 列分别为散斑图样 (800×800 像素)、散斑自相关图样 (取中心 200×200 像素)、自相关横截面和相同孔径透镜聚焦焦斑图。图中的散射介质采用的是 220 目数的毛玻璃片。拍摄的散斑图样由于曝光时间不一致, 亮暗有少许不同, 呈现杂乱无章的亮暗斑点分布。实际上, 散斑是激光波前通过散射介质后随机的相位延迟产生的干涉条纹, 满足惠更斯-菲涅尔原理。将图像用自相关程序处理后, 中心出现一亮点, 同时外圈有起伏的弱斑点, 因为自相关运算总

会有个别散斑叠加出现一定起伏。我们采用刀口仪和 CMOS 分别拍摄 20 次的图样, 计算取平均值得出结果。可以发现, 自相关图的半高全宽与透镜出射后的焦斑的强度分布图形相似, 呈现类似爱丽斑形状。

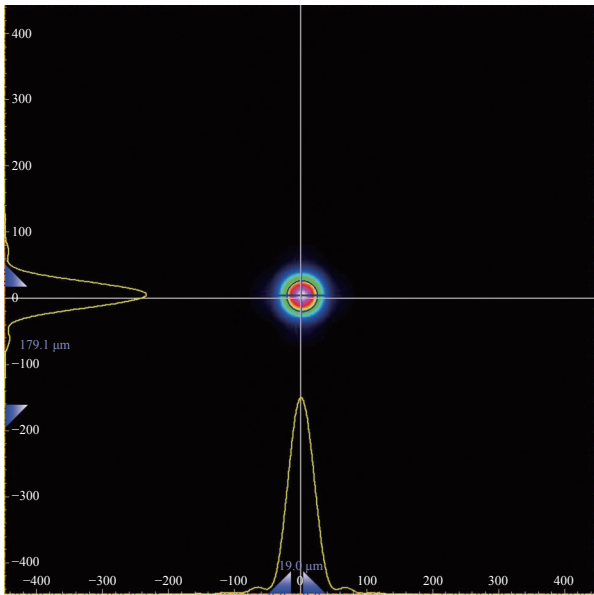


图 4 刀口仪捕获焦斑图像

Fig. 4 Focal spot image captured by knife-edge tester

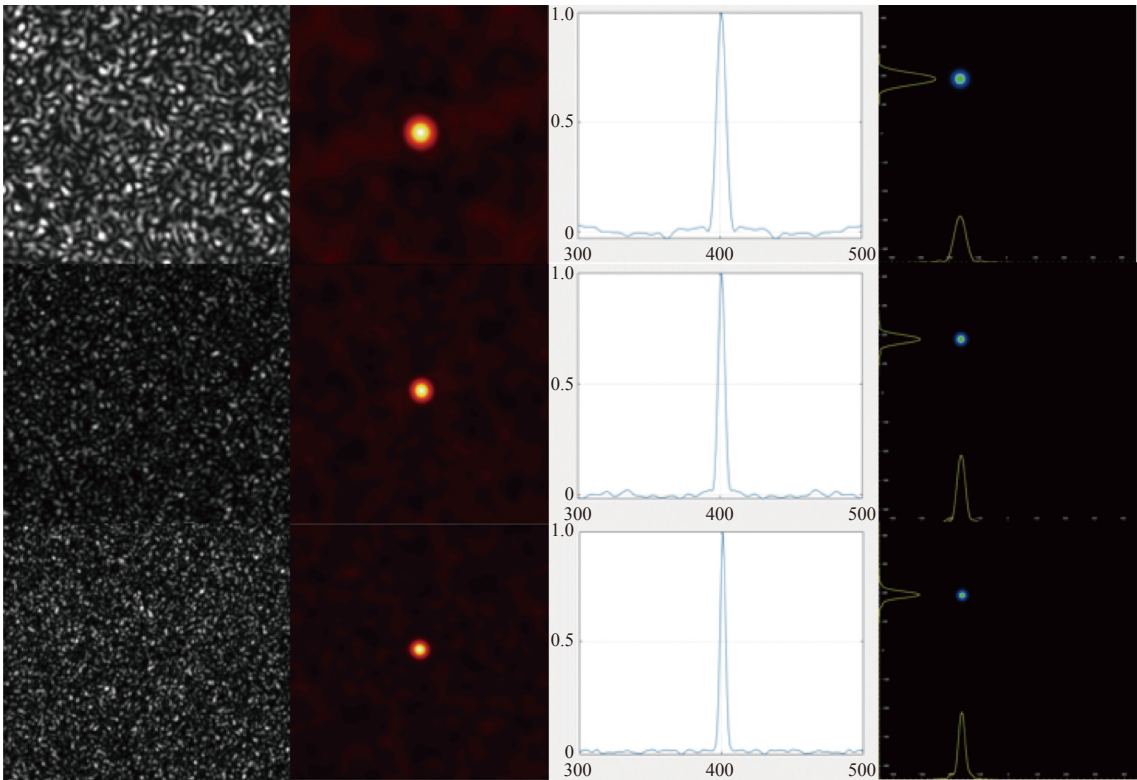


图 5 散斑自相关与透镜聚焦分辨率比对

Fig. 5 Comparison of speckle autocorrelation and lens focusing resolution

3 实验结果与分析

3.1 透镜焦斑和散斑自相关的测量

表 1 中, 第 1 列为实验所用环形光阑直径, 实际焦斑直径即为刀口仪拍摄下焦斑的半高全宽; 表 2 中, 第 1 列仍为实验所用环形光阑直径, 第 2 列为用 CMOS 相机拍摄下的散斑自相关的半高全宽。所有实验数据为抓拍测量 20 次后得出的平均值。

表 1 通过透镜后的焦斑测量

Table 1 Focal spot measurement through lens

光阑直径 d/mm	实际焦斑 直径 $y/\mu\text{m}$	阿贝判据 理论值 μm	误差/%
17	44.008	41.657	5.644
15	49.587	47.212	5.030
12	61.364	58.991	4.021
10	71.901	70.672	1.739
8	89.256	88.340	1.037

表 2 通过散射介质后的散斑测量

Table 2 Speckle measurement through scattering medium

光阑直径 d/mm	散斑自相关 测量值 $y/\mu\text{m}$	阿贝判据理 论值 μm	误差/%
17	45.079	41.657	8.214
15	50.400	47.212	6.753
12	61.314	58.991	3.938
10	72.688	70.672	2.853
8	90.158	88.340	2.058

由表 1、表 2 数据可知, 焦斑、散斑的直径(半高全宽, 即等价于实验所得透镜和毛玻璃片的成像分辨率), 两者趋势相同且数值接近, 直径相差最小仅为 $0.05\ \mu\text{m}$ 。随着光阑直径的增加, 对应的焦斑和散斑的直径减小, 即说明成像分辨率下降。值得注意的是, 理论值与实际值的误差也在增加。

3.2 结果修正

由于氦氖激光器出射激光在并非理想的平面波, 其强度受到高斯函数调制。因此, 阿贝判据不能直接地被使用, 我们需要对阿贝判据做一定的修正, 从而使该实验所测得数据更加符合理论结果。图 6 为此模型对应原理图。

定义 f_0 为填充因子:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{f \sin \theta_{\max}} \quad (7)$$

式中: ω_0 是光腰; 透镜的孔径为 $f \sin \theta_{\max}$ 。

因此可以推出:

$$f_\omega(\theta) = e^{-\frac{1}{f_0^2} \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \theta_{\max}}} \quad (8)$$

式中: f_ω 即为高斯轮廓。

由于入射光斑尺寸远大于 CMOS 的面积, f_0 无法直接实验获得。在 matlab 中先建立起一高斯模型, 通过调整 f_0 来调整高斯模型的高斯半径。从方法上我们只需要在不插入第 2 个透镜的情况下直接测量激光的光束轮廓分布。但是由于 CMOS 的尺寸限制, 我们只能探测到局部的高斯轮廓, 对 f_0 因子的获取不够准确, 此外当此高斯通过光阑后, 再传播到第 2 个透镜时会发生再次的衍射, 不同尺寸光阑对 f_0 的影响也不同。因此实验先在不透镜 2 的情况下获得入射高斯光的粗糙 f_0 值。然后, 采用 CCD 拍摄第 2 个透镜后的光强分布, 通过傅里叶变换计算得到实际的半高全宽。将此模型的半高全宽与第 2 个透镜位置后的半高全宽进行对比, 分析误差, 当误差小于 1% 时, 可以认为此时模型与实际情况贴合度高, 模型建立成功。最后, 在所有透镜位置参数不改变的情况下, 通过改变光斑的直径(即对应放置不同的孔径光阑)来对应不同的光场情况。

表 3 和表 4 为修正后的结果, 理论上, 阿贝判据的适用条件是平面波, 而在实际实验中准直透镜后出射的并非理想平面波, 而是高斯光束, 因此通过建立的高斯模型, 将阿贝判据中的平行光转换成高斯光束, 在数学表达式上等价于对阿贝判据中的系数 0.51 进行修正。修正后的理论值明显更贴合实际测量值。误差有效减小 5%, 控制在 1.6% 以内, 但随着孔径直径的增加, 误差依然会随之增大。据此本文首次实验提出并验证散斑相关成像恢复法的真实分辨能力需要考虑入射场的孔径函数。

3.3 误差与讨论

比较表 4 和表 3, 可以发现, 同等孔径下, 散斑自相关的尺寸略大于透镜聚焦的尺寸, 我们可用等效数值孔径 NA 来解释。由图 7 中光路推算可得 $\alpha > \beta > \gamma$ (具体推导过程可以采用解析几何的方法, 求两直线夹角), 中心散斑尺寸具有等同于透镜聚焦的尺寸, 但随着位置偏离轴心, 散斑尺寸会略微增加, 导致散斑自相关的总体尺寸增加。此外, 光阑不可能与透镜 2 完全在同一个平面, 光波入射到透镜 2 前会有一定的衍射, 影响散斑尺寸^[37-38], 同时, 光阑的锐边衍射将激发高阶衍射波场^[39], 也会有一定的影响。

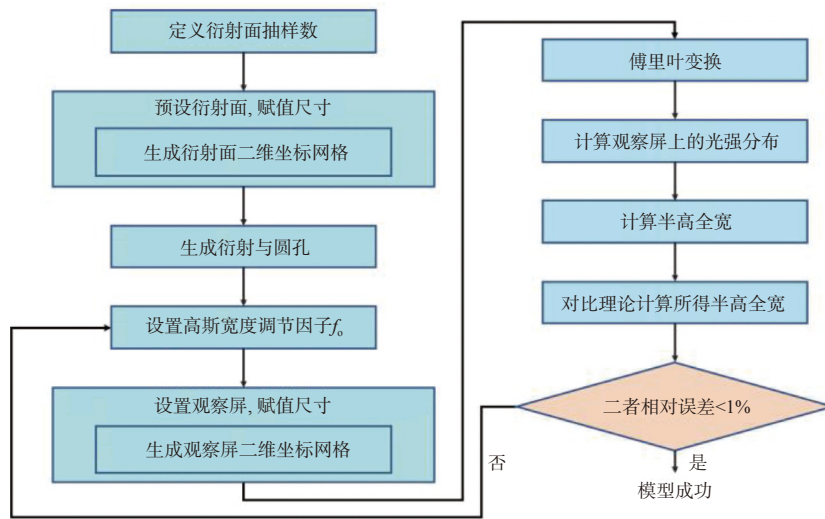


图6 模型建立原理

Fig. 6 Schematic diagram of model establishment

表3 通过透镜后的焦斑测量(修正后)

Table 3 Focal spot measurement through lens (corrected)

光阑直径 d/mm	实际焦斑 直径 $y/\mu\text{m}$	修正系数	修正理论值 $/\mu\text{m}$	误差/%
17	44.008	1.057	44.363	0.752
15	49.587	1.045	49.642	1.138
12	61.364	1.031	61.112	0.919
10	71.901	1.025	72.626	0.999
8	89.256	1.020	90.308	0.650

表4 通过散射介质后的散斑测量(修正后)

Table 4 Speckle measurement through scattering medium (corrected)

光阑直径 d/mm	散斑自相关 测量值 $y/\mu\text{m}$	修正系数	修正理论值 $/\mu\text{m}$	误差/%
17	45.079	1.044	44.363	1.616
15	50.400	1.051	49.642	1.527
12	61.314	1.035	61.112	0.325
10	72.688	1.027	72.626	0.088
8	90.158	1.022	90.308	0.164

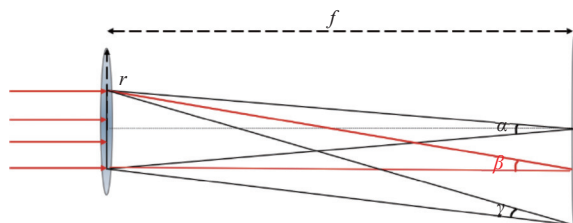


图7 CMOS不同位置散斑对应的等效数值孔径

Fig. 7 Equivalent numerical aperture corresponding to speckles at different locations of CMOS plane

4 结论

经过修正后的阿贝判据与理论值误差进一步缩小,且随着光阑直径的减小,焦斑/散斑的直径增大,误差也随之减小。相信我们可以通过进一步的探究,寻找修正后的阿贝判据来推算不同光阑的直径关系。

本文对散斑关联成像时极限的判断标准进行了高斯修正,将阿贝理论扩展以用至平行光和高斯光束。在不为平面波的条件下,阿贝判据不能直接被使用,需要对适用与平行光束条件的阿贝判据系数进行修正。利用实际光场作傅里叶变换计算得到系统成像分辨能力,验证通过 matlab 建立的理论高斯模型是否符合,通过多次反复调整,成功模拟了高斯光束出射时全光场的光强分布,修正了阿贝判据前的常数系数,实验结果与高斯模型的理论模拟结果误差仅为 1.2%。

参考文献:

- [1] FREUND I. Looking through walls and around corners[J]. *Physica A*, 1990, 168: 49-65.
- [2] GU M, GAN X, DENG X. Microscopic imaging through turbid media[M]. 缺出版地: Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [3] MOSK A P, LAGENDIJK A, LEROSEY G, et al. Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 283-292.
- [4] KATZ O, SMALL E, SILBERBERG Y. Looking around

- corners and through thin turbid layers in real time with scattered incoherent light[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 549-553.
- [5] VELLEKOOP I M, MOSK A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [6] YAQOOB Z, PSALTIS D, FELD M, et al. Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2: 110-115.
- [7] HSIEH C L, PU Y, GRANGE R, et al. Imaging through turbid layers by scanning the phase conjugated second harmonic radiation from a nanoparticle[J]. *Optical Express*, 2010, 18: 20723-20731.
- [8] WANG Y M, JUDKEWITZ B, DIMARZIO C A, et al. Deep-tissue focal fluorescence imaging with digitally time-reversed ultrasound-encoded light[J]. *Nature Communication*, 2012, 3: 928.
- [9] POPOFF S, LEROSEY G, FINK M, et al. Image transmission through an opaque material[J]. *Nature Communication*, 2010, 1: 81-86.
- [10] POPOFF S M, LROSEY G, CARMINATI R, et al. Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media[J]. *Physical Review*, 2010, 104: 100601-100604.
- [11] CHOI Y, YOON C, KIM M, et al. Scanner-free and wide-field endoscopic imaging by using a single multimode optical fiber[J]. *Physical Review*, 2012, 109: 203901-203905.
- [12] BERLOTTI J, PUTTEN E G, BLUM C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491: 232-234.
- [13] KATZ O, HEIDMANN P, FINK M, et al. Non-invasive single-shot imaging through scattering layers and around corners via speckle correlations[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 784-790.
- [14] WU T, KATZ O, SHAO X, et al. Single-shot diffraction-limited imaging through scattering layers via bispectrum analysis[J]. *Optical Letter*, 2016, 41(21): 5003-5006.
- [15] LI L, LI Q, SUN S, et al. Imaging through scattering layers exceeding memory effect range with spatial-correlation-achieved point-spread-function[J]. *Optical Letter*, 2018, 43(8): 1670-1673.
- [16] XU X, XIE X, THENDIYAMMAL A, et al. Imaging of objects through a thin scattering layer using a spectrally and spatially separated reference[J]. *Optical Express*, 2018, 26(12): 15073-15083.
- [17] XIE X, ZHUANG H, ZHOU J, et al. Extended depth-resolved imaging through a thin scattering medium with PSF manipulation[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4585-4594.
- [18] SAUNDERS C, MURRAY B J, GOYAL V K. Computational periscopy with an ordinary digital camera[J]. *Nature*, 2019, 565(7740): 472-475.
- [19] WANG X, JINX, LI J. Blind position detection for large field-of-view scattering imaging[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(6): 920-928.
- [20] LI W, LIU J, HE S, et al. Multitarget imaging through scattering media beyond the 3D optical memory effect[J]. *Optical Letter*, 2020, 45(10): 2692-2695.
- [21] YANG W, LI G, SITU G. Imaging through scattering media with the auxiliary of a known reference object[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 9614-9622.
- [22] NEWMAN J A, QIAOEN L, WEBB K J. Imaging hidden objects with spatial speckle intensity correlations over object position[J]. *Physical Review*, 2016, 116(7): 073902.1-073902.6.
- [23] EDREI E, SCARCELLI G. Optical imaging through dynamic turbid media using the Fourier-domain shower-curtain effect[J]. *Optica*, 2016, 3(1): 71-74.
- [24] XIE X S, QI Z H, ZHOU J Y, et al. Non-invasive optical imaging using the extension of the Fourier-domain shower-curtain effect[J]. *Optical Letter*, 2021, 46(1): 98-101.
- [25] 谢向生, 刘忆琨, 周建英, 等. 散斑相关成像: 从点扩展函数到光场全要素(特邀综述)[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111004.
- XIE X S, LIU Y K, ZHOU J Y. Speckle Correlation Imaging: from Point Spread Functions to Light Field Plenoptics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111004.
- [26] HE H X, XIE X S, LIU Y K, et al. Exploiting the point spread function for optical imaging through a scattering medium based on deconvolution method[J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2019, 12(8): 1930005.
- [27] 张莉, 刘元硕, 荣振宇, 等. 利用激光散斑测量透明材料的折射率[J]. *物理实验*, 2021, 41(6): 37-40.
- ZHANG Li, LIU Yuanshuo, RONG Zhengyu, et al. The refractive index of transparent materials was measured by laser speckle[J]. *Physical experiment*, 2021, 41(6): 37-40.

- [28] 王志军, 于之靖, 马凯, 等. 数字散斑亚像素小角位移测量的曲面拟合法[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 256-263.
WANG Zhijun, YU Zhijing, MA Kai, et al. Surface fitting method for digital speckle subpixel measurement of small angular displacement[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(2): 256-263.
- [29] 韩刚, 许亚娥, 沈阳, 等. 散斑技术在激光寻的制导武器仿真系统中的应用[J]. 应用光学, 2015, 36(3): 356-361.
HAN Gang, XU Yae, SHEN Yang, et al. Application of speckle technique in laser homing guided weapon simulation system[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(3): 356-361.
- [30] 吴凡, 吴思进, 李伟仙, 等. 应用数字散斑投影测量纸页厚度[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 847-852.
WU Fan, WU Sijin, LI Weixian, et al. The paper thickness was measured by digital speckle projection[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 847-852.
- [31] GOODMAN J W. Statistical properties of laser speckle patterns. in: dainty, J. C. (eds) laser speckle and related phenomena. topics in applied physics[M]. Heidelberg: Springer, Berlin, 1975, 9: 9-75.
- [32] NOVOTNY L, HECHT B. The Principle of Nano Optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, New York, 2006: 93-94.
- [33] RICHARDS B, WOLF E. Electromagnetic diffraction in optical systems II. structure of the image field in an aplanatic system[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1959, 253: 358-379.
- [34] VELLEKOOP I M, MOSK A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media [J]. Optics Letters. 2007, 32(16): 2309-2311.
- [35] 谢向生, 魏洁, 周建英, 等. 散射透镜的成像原理及应用[J]. 物理实验, 2021, 41(8): 1005-4642.
XIE Xiangsheng, WEI Jie, ZHOU Jianying, et al. Imaging principle and application of scattering lens[J]. Physical experiment, 2021, 41(8): 1005-4642.
- [36] GOODMAN J W. 光学中的散斑现象[M]. 曹其智, 陈家璧, 译. 北京: 科学出版社, 2009: 65-67.
GOODMAN J W. Speckle phenomenon in optics[M]. CAO Qizhi, CHEN Jiabi, translated. Beijing: Science Press, 2009: 65-67.
- [37] FREUND I. Looking through walls and around corners [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1990, 168: 49-65.
- [38] YANG L X, XIE X S, ZHOU J Y, et al. Minimized spot of annular radially polarized focusing beam[J]. Optical Letter, 2013, 38: 1331-1333.
- [39] HU Y W, FU S H, LI Z, et al. Focusing optical waves with a rotationally symmetric sharp-edge aperture[J]. Optics Communications, 2018, 413: 136-140.