

基于多角度无透镜傅里叶变换数字全息的散斑噪声抑制成像研究*

王大勇 王云新[†] 郭莎 戎路 张亦卓

(北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

(北京工业大学微纳信息光子技术研究所, 北京 100124)

(北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124)

(2014年1月23日收到; 2014年3月13日收到修改稿)

在数字全息成像中, 散斑噪声严重影响了再现像的信噪比和成像分辨率, 因此为了提高数字全息成像质量, 迫切需要抑制再现像的散斑噪声. 分析并给出了矩形散射光斑的强度协方差, 定量计算了特定实验条件下产生退相关散斑图样的最小角度差. 结合透镜的性质设计并搭建了多角度无透镜傅里叶变换数字全息成像系统, 利用光纤端面在透镜焦平面的二维机械移动代替传统反射镜的旋转, 使照明光束在不改变照明位置和大小同时, 可任意改变光束方向. 移动光纤端面使多角度照明满足最小角度差, 获取了81幅数字全息图. 利用单次快速傅里叶逆变换实现数值再现, 对多幅再现像的强度像求平均, 实验结果表明散斑对比度降低为单幅再现像的14.6%, 使图像信噪比提高了6.9倍. 该抑制散斑的多角度数字全息成像方法有效的抑制了散斑噪声, 且成像光路结构简单, 可操作性强.

关键词: 数字全息, 散斑噪声, 数值再现, 数字图像处理

PACS: 42.40.-i, 42.30.Ms, 42.30.Va

DOI: 10.7498/aps.63.154205

1 引言

数字全息是传统光学全息术、计算机技术及光电探测技术相结合的产物, 该技术利用二维面阵光电探测器代替传统光学全息术中的银盐干板和感光胶片等介质记录数字全息图, 并由计算机模拟光学衍射过程实现被记录物体的数值再现. 与传统的光学全息相比, 数字全息成像具有全视场、实时、定量相衬成像等独特优势, 已经广泛应用到微纳元件检测、生物细胞相衬成像、粒子场分析等领域^[1-7]. 然而, 数字全息成像中往往采用相干性较好的激光作为光源, 而相干光波在粗糙物体表面反射或透射时, 物体上各点散射的子波在空间相干叠加, 就形

成了空间强度随机分布的颗粒状散斑噪声. 散斑噪声的存在大大降低了再现图像的信噪比和分辨率^[8,9], 恶化了系统成像性能, 因此抑制散斑噪声对改善数字全息再现像的质量具有重要意义.

目前主要采用数字图像处理和光学成像方法降低散斑噪声. 数字图像处理方法通过数字滤波从单幅全息图中提取物体信息, 如小波变换滤波, 傅里叶变换频域滤波, 非局部均值滤波等^[9-13]. 然而, 数字图像处理方法会带来不可避免的物信息丢失, 并且这些方法对散斑噪声抑制的程度非常有限. 光学成像方法主要通过降低光源的相干性或者对多幅散斑图样求平均两种方法降低再现像的散斑噪声. 如Remmersmann等直接利用具有短

* 国家自然科学基金(批准号: 61077004, 61205010, 61307010)、北京市自然科学基金(批准号: 1122004)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20121103120003)、北京市教育委员会科技计划项目(批准号: KM201310005031)、中国博士后科学基金(批准号: 2013M540828)、北京市博士后科研活动经费资助(批准号: 2013ZZ-17)和中央支持地方专项配套项目资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: yxwang@bjut.edu.cn

相干长度的发光二极管(LED)或者超发光二极管(SLED)作为光源进行成像^[14,15],然而这类降低光源相干性的方法会降低系统的焦深和成像质量,同时对物参光的光程差有严格要求^[16,17].多幅散斑图样求平均方法则是通过叠加多幅退相关散斑图样的再现像来降低散斑噪声,且叠加图像的数量越多,散斑噪声的抑制效果越好.为了获取多幅包含退相关散斑图样的全息图,可采用波长多样化、偏振态多样化,照明角度多样化等方法^[18-23].波长多样化方法需要特殊的可调谐激光器,然而激光器的调谐范围大大限制了可记录的包含退相关图样的全息图数量.偏振态多样化方法为了保证所获得全息图彼此退相关,要求记录两幅全息图的参考光波或者物光波的偏振态变化量大于 20° ^[19],因此这种方法也无法获得大量的退相关全息图,使再现像成像质量的改善程度受到局限.照明角度多样化通过改变待测物体的照明角度使散斑图样退相关,该方法实际是在时序上实现了部分相干照明,且实验证明散斑噪声对于照明角度变化十分敏感,一个很小的角度就可以保证散斑图样的退相关性,因此该方法得到了广泛关注.Quan等通过连续改变单个反射镜照射物体的角度获得多幅离轴全息图^[21],此照明结构简单,但随着反射镜的旋转,照明光斑的中心位置也随之发生变化,这对照明光斑大小和均匀度提出了很高的要求.Pan等通过组合反射镜改变照明光束的角度^[22],成像系统的结构较为复杂,且对反射镜的一个小的调整,就可能使照明光束具有较大的倾斜,因此利用单个反射镜或者组合反射镜控制光束的倾斜照明的可操作性较差.

针对多角度照明光路的设计问题,本文结合透镜的性质,构建了多角度照明无透镜傅里叶变换数字全息成像系统,使照明光束在不改变照明光斑位置和大小同时,可任意改变光束方向.在多角度照明下获取了81幅数字全息图.利用单次快速傅里叶变换计算物平面的复振幅分布,对多幅再现像的强度像求平均,使散斑对比度大幅度下降,大大提高了数字全息成像的质量.

2 多角度照明抑制散斑噪声

2.1 抑制散斑噪声的原理

通过改变待测物体照明光波的照射角度,可以改变探测平面上散斑图样的强度分布.当照明光的

角度变化足够大时,所获得的两幅散斑图样彼此退相关.在待测样品表面建立坐标系 (α, β, z) , z 轴为表面法线方向,散射矢量 \mathbf{q} 定义为^[23]

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_t + q_z \mathbf{z} = \mathbf{k}_o - \mathbf{k}_i, \quad (1)$$

其中 \mathbf{q}_t 和 q_z 分别是散射矢量 \mathbf{q} 的横向分量和法向分量, \mathbf{k}_i 是物体照明光的平均波矢, \mathbf{k}_o 是观察方向的波矢,其长度均为 $k = 2\pi/\lambda$, λ 是照明光波长.

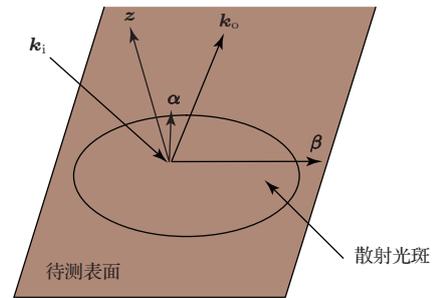


图1 待测样品的散射示意图

在固定波长,固定观察方向的条件下,分时采用两束不同方向的照明光照明物体,相应可以获得两幅散斑图样,这两幅散斑图样的相关性可以利用强度协方差来表征,强度协方差为

$$|\mu_A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)|^2 = |M_h(\Delta q_z)|^2 |\psi(\Delta \mathbf{q}_t)|^2, \quad (2)$$

其中 $\psi(\Delta \mathbf{q}_t)$ 为照明方向的变化引入的散斑位移量, $M_h(\Delta q_z)$ 为表面高度涨落的一阶特征函数. $\Delta \mathbf{q}_t$ 是散射矢量差 $\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2$ 的横向分量, Δq_z 是散射矢量差的法向分量.对于反射型物体有

$$\begin{aligned} \Delta q_z &= \frac{2\pi}{\lambda} [\cos(\theta_{i1} + \Delta\theta_i) - \cos\theta_{i1}], \\ \Delta \mathbf{q}_t &= \frac{2\pi}{\lambda} [\sin(\theta_{i1} + \Delta\theta_i) - \sin\theta_{i1}]. \end{aligned} \quad (3)$$

$M(\Delta q_z)$ 取决于散射表面的性质,假设产生散斑图样的散射表面的高度涨落为高斯分布,则 $M(\Delta q_z)$ 可表示为

$$|M_h(\Delta q_z)|^2 = \exp(\sigma_h^2 \Delta q_z^2), \quad (4)$$

式中, σ_h 为散射表面的高度标准偏差.

$\psi(\Delta \mathbf{q}_t)$ 与散射光斑尺寸相关,若散射光斑是长宽分别为 a 和 b 的强度均匀的矩形光斑,则强度协方差可表示为

$$\psi(\Delta \mathbf{q}_t) = 2 \sin c(0.5a\Delta q_t) \sin c(0.5b\Delta q_t). \quad (5)$$

综上所述,表面高度涨落为高斯分布的矩形散射光斑,产生的散斑图样的强度协方差为

$$|\mu_A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)|^2$$

$$= \exp(\sigma_h^2 \Delta q_z^2) \times [2 \sin c(0.5a\Delta q_t) \sin c(0.5b\Delta q_t)]^2. \quad (6)$$

强度协方差越小, 表明两幅散斑图样的相关度越低. 通常来说如果强度协方差 $|\mu_A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)|^2 < 0.05$, 则两个散斑图样近似退相关^[24].

在文献^[24]中, 针对角度多样化方法, 我们提出了可以保证两幅散斑图样退相关的最小角度差这一参量, 并针对散射圆斑给出了最小角度差的计算方法. 若散射光斑为 $40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的矩形光斑, 针对高度标准偏差为 $707 \text{ }\mu\text{m}$ 的散射物体, 结合(6)式可得产生退相关散斑图样的最小角度差为 0.00025° , 因此当两束照明物体光波的角度差大于 0.00025° 时, 可以保证获得的散斑图样退相关.

2.2 多角度照明的优化设计

利用透镜的性质对多角度照明光路进行了优化设计, 光路结构如图2所示. 图中 x_i - y_i 为透镜的物方焦平面, F 为透镜的焦点, x_o - y_o 为像方焦平面, 也为物体所在平面. 设透镜光心坐标为 $(0, 0, 0)$, 则 F 的坐标为 $(0, 0, -f)$, 若将点光源放在透镜的物方焦点 F 处, 则经过透镜产生一束与光轴平行的光束; 若将点光源放在透镜的物方焦平面上任意一点 $P(x_i, y_i, -f)$ 处, 则经过透镜后就会变为倾斜平行光, 设该倾斜光束方向与光轴方向的角度差为 θ , 则角度差 θ 为

$$\theta = \arccos\left(\frac{f}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}}\right). \quad (7)$$

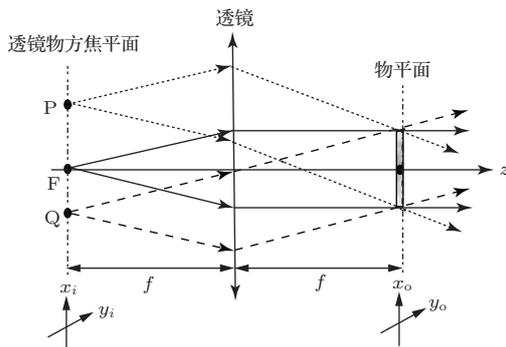


图2 多角度照明原理图

因此通过改变点光源在焦平面的位置, 即可改变光束的倾斜角度, 而物体放置在透镜的后焦面上, 即可实现对物体的倾斜照明. 以 P, Q 和 F 三个分别位于轴外和轴上点的点光源为例, 只要照明点

光源位于透镜焦平面上, 其经过透镜后的准直光均为平行光, 且沿不同角度的照明均位于物平面的同一区域上, 即照明物体的光斑大小和中心位置不变. 因此本方法采用点光源的平面二维机械移动代替了传统反射镜的旋转, 可实现照明光束角度的控制, 易于操作, 且获得的照明光斑不发生位移, 降低了对成像系统照明光斑的大小和均匀度的要求.

3 多角度照明数字全息成像实验

3.1 实验装置

多角度照明数字全息成像实验装置的结构如图3所示, 采用中心波长为 532 nm 、功率为 150 mW 的半导体激光器作为光源, 光源发出的光波通过耦合器耦合到 1×2 的分束器中. 考虑到光纤纤芯直径仅为几个微米, 分束光纤1和光纤2出射的光波可作为较为理想的球面光. 将分束光纤1固定在一个二维平移台上, 且光纤1的输出端面位于透镜的焦点处, 将待测物体放置在透镜的像方焦平面上. 通过调节二维平移台使光纤1在透镜的物方焦平面上进行二维扫描, 从而可以获得不同照明方向下的物光波. 耦合器分束光纤2出射的球面光通过BS反射到CCD靶面上作为参考光波. 利用CCD获取多角度物光波和参考光波的干涉图样, 即可获得不同照明角度下的多幅全息图. 物体到CCD的距离和分束光纤2到CCD的距离相等, 这就构成了无透镜傅里叶变换数字全息. 实验采用的CCD像素尺寸为 $3.45 \text{ }\mu\text{m} \times 3.45 \text{ }\mu\text{m}$, 分辨率为 2448×2505 个像素, 透镜的焦距 f 为 75 mm .

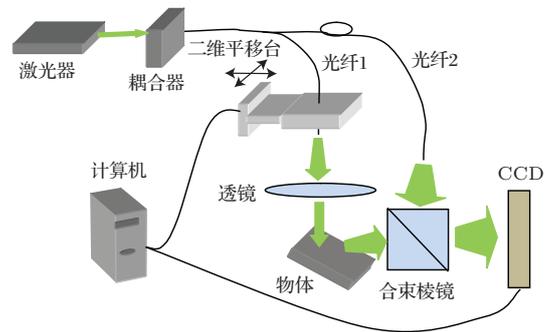


图3 多角度照明无透镜傅里叶变换数字全息光路图

3.2 数值处理

无透镜傅里叶变换数字全息图本质是记录了物体的频谱, 对全息图进行一次快速傅里叶变换

即可实现数值再现^[25]. 设 N 是记录全息图的总数, 则对 N 幅全息图的强度再现像做平均可以表示为

$$R^N(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \mathfrak{F} \left\{ H^{(k)}(x, y) \right\} \right|^2, \quad (8)$$

其中 $H^{(k)}(x, y)$ 表示第 k 张全息图, $\mathfrak{F}\{ \}$ 表示快速傅里叶变换, $R^N(x, y)$ 是对 N 幅全息图的强度再现像平均后得到的强度像.

通常利用散斑对比度 c 来衡量图像的散斑噪声水平, 散斑对比度定义为

$$c = \frac{\sigma_I}{\bar{I}}, \quad (9)$$

式中 σ_I 为散斑图样的标准差, \bar{I} 为散斑图样的平均值. 可见散斑对比度是散斑图样中强度涨落大小相对于平均强度的度量. 散斑对比度越小, 表明图像的散斑噪声越小. 设单幅散斑图样的散斑对比度为 c_1 , 若叠加 N 幅彼此独立的散斑图样并取均值后, 理论上散斑噪声将下降为 c_1/\sqrt{N} ^[23], 图像信噪比将提高 \sqrt{N} 倍.

4 实验结果

结合光纤搭建了多角度照明无透镜傅里叶变换数字全息装置, 采集了多幅全息图. 实验中, 我们将 1 分硬币作为待测样品, 并在物平面做矩形孔限制物光场, 物光场大小约为 $40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 图样为硬币的“分”字, 利用白光干涉仪测量其高度标准偏差约为 707 nm . 保持参考光路不变, 利用图 3 中的平移台移动光纤端面做二维扫描, 以透镜的物方焦点 $F(0, 0, -f)$ 为中心, 每次扫描平移台移动间隔是 0.5 mm , 扫描位置如图 4 (a) 中黑点所示, 扫描区域为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的方形区域 $P_1P_2P_3P_4$, 扫描位置构成了 9×9 的方阵, 每扫描到一个位置就形成了不同的倾斜照明光束, 便记录一幅全息图, 二维平移台共扫描了 81 个位置, 分时记录了 81 幅全息图. 以平行于光轴的光波作为参考光束, 利用 (7) 式可计算其余 80 个倾斜光束与参考光束的角度差, 结果如图 4 (b) 所示. 其中最小角度差为 0.32° , 最大角度差为 2.16° , 远大于第 2 小节中给出的最小光波角度差 0.00025° , 可以保证相邻照明光波产生的散斑图样退相关.

对全息图进行一次快速傅里叶变换即可实现数值再现, 且再现后物体的位置与物光波的照明方

向无关, 而仅与参考光相对于物体的位置有关^[26], 因此无需进行平移和配准操作. 图 5 (a) 为单幅全息图再现的强度像, 图 5 (b)—(d) 分别是当对 4 幅, 16 幅和 81 幅再现像叠加后求均值后的再现像. 从图中可以看到散斑噪声得到了明显抑制. 为了定量分析散斑噪声的抑制效果, 我们在再现像中选择了一块 70×50 像素大小的平坦均匀区域, 如图 5 (a) 中方框所示, 利用 (9) 式计算单幅全息图再现像在方框区域的散斑对比度, 结果为 0.5301. 同样计算图 5 (b)—(d) 中方框区域的散斑对比度, 结果分别为 0.2608, 0.1405, 0.0773, 理论散斑对比度分别为 0.2650, 0.1325, 0.0589, 可以看出随着使用全息图数量的增多, 散斑对比度逐渐减小, 且实验散斑对比度与理论散斑对比度十分接近, 对 81 幅全息图再现像叠加平均后, 散斑对比度降低为单幅全息图再现像的 14.6%, 图像信噪比提高了 6.9 倍. 图 6 给出了随着叠加全息图数量的增加, 散斑对比度的变化曲线, 结果表明理论散斑对比度和实验得到的散斑对比度具有很好的一致性.

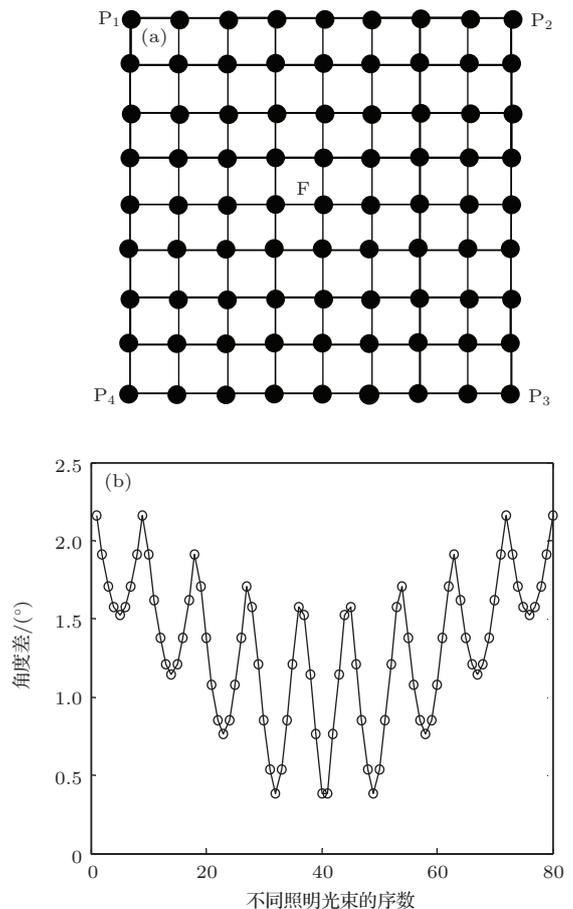


图 4 (a) 光纤端面在透镜物方焦平面的扫描示意图; (b) 80 个倾斜光束与参考光束的角度差

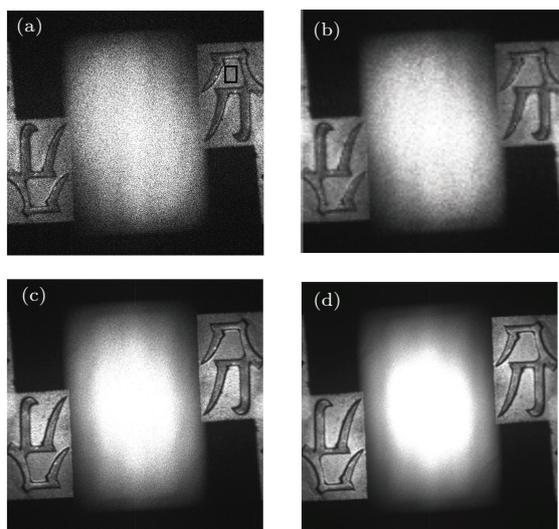


图5 多幅全息图再现像的平均再现像 (a) 1幅全息图 ($c = 0.5301$); (b) 4幅全息图 ($c = 0.2608$); (c) 16幅全息图 ($c = 0.1405$); (d) 81幅全息图 ($c = 0.0773$)

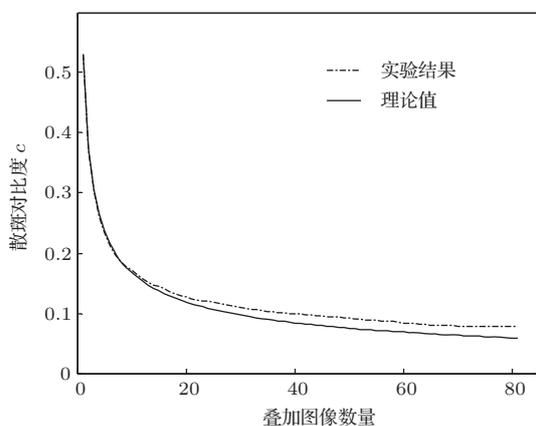


图6 散斑对比度和叠加图像数量的关系

5 结 论

本文分析并给出了矩形散射光斑的强度协方差的表达式, 定量计算了特定实验条件下产生退相关散斑图样的最小角度差. 结合透镜的性质设计并搭建了多角度照明无透镜傅里叶变换数字全息成像系统, 将光纤的输出光作为球面点光源, 利用光纤端面的平面二维机械移动代替传统反射镜的旋转, 实现了光束照明角度的控制, 采用多角度照明产生退相关散斑图样, 获取了81幅数字全息图. 利用单次快速傅里叶变换获取了物平面的复振幅分布, 对多幅再现像的强度像求平均, 使散斑对比度降低为单幅全息图再现像的14.6%. 该抑制散斑的数字全息成像方法使物体的照明光斑仅改变照明

角度而不发生光斑的位移, 降低了对照明光斑的大小和均匀度的要求, 有效的抑制了散斑噪声, 成像光路具有结构简单、可操作性强的特点. 此外, 值得一提的是对不同方向的离轴照明, 不仅可以降低散斑噪声, 还可以使CCD接收部分更高频的物光波信息, 有助于提高数字全息成像的空间分辨率.

参考文献

- [1] Colomb T, CuChe E, Charriere F, Kühn J, Aspert N, Montfort F, Marquet P, Depeursinge C 2006 *Appl. Opt.* **45** 851
- [2] Ferraro P, Nicola S D, Finizio A, Coppola G, Grilli S, Magro C, Pierattini G 2003 *Appl. Opt.* **42** 1938
- [3] Javidi B, Tajahuerce E 2000 *Opt. Lett.* **25** 610
- [4] Kemper B, Bauwens A, Vollmer A, Ketelhut S, Langehanenberg P, Müthing J, Karch H, von Bally G 2010 *Journal of Biomedical Optics* **15** 036009
- [5] Lü Q N, Chen Y L, Yuan R, Ge B Z, Gao Y, Zhang Y M 2009 *Appl. Optics* **48** 7000
- [6] Zhang Q S, Lv X X, Yu Q T, Liu G Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2764
- [7] Li J C, Fan Z B, Tankam P, Song Q H, Picart P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034204 (in Chinese) [李俊昌, 樊则宾, Tankam Patrice, 宋庆和, Picart Pascal 2011 物理学报 **60** 034204]
- [8] Claus D, Fritzsche M, Iliescu D, Timmerman B, Bryanston-Cross P 2011 *Appl. Optics* **50** 4711
- [9] Uzan A, Rivenson Y, Stern A 2013 *Appl. Optics* **52** A195
- [10] Sharma A, Sheoran G, Jaffery Z A, Moinuddin 2008 *Opt. Lasers Eng.* **46** 42
- [11] Maycock J, Hennelly B M, McDonald J B, Frauel Y, Castro A, Javidi B, Naughton T J 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 1617
- [12] Bianco V, Paturzo M, Memmolo P, Finizio A, Ferraro P, Javidi B 2013 *Opt. Lett.* **38** 619
- [13] Cai X O, Ni X J 2013 *Laser & Optoelectronics Progress* **50** 050901 (in Chinese) [蔡晓鸥, 倪小静 2013 激光与光电子学进展 **50** 050901]
- [14] Remmersmann C, Stüwald S, Kemper B, Langehanenberg P, Bally G. Von 2009 *Appl. Optics* **48** 1463
- [15] Langehanenberg P, Bally G, Kemper B 2010 *J. Mod. Opt.* **57** 709
- [16] Pan F, Xiao W, Liu S, Rong L 2013 *Opt. Commun.* **292** 68
- [17] Kozacki T, Józwicki R 2005 *Opt. Commun.* **252** 188
- [18] Nomura T, Okamura M, Nitani E, Numata T 2008 *Appl. Optics* **47** D38
- [19] Rong L, Xiao W, Pan F, Liu S, Li R 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 653
- [20] Park Y K, Choi W, Yaqoob Z, Dasari R, Badizadegan K, Feld M S 2009 *Opt. Express* **17** 12285
- [21] Quan C G, Kang X, Tay C J 2007 *Opt. Eng.* **46** 115801
- [22] Feng P, Wen X, Lu R 2009 *Opt. Express* **17** 5473

- [23] Goodman J W 2009 *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* (Science Press) p131 (in Chinese) [Goodman J W 著, 曹其智, 陈家璧译 2009 光学中的散斑现象——理论与应用 (科学出版社) 第 131 页]
- [24] Wang Y, Meng P, Wang D, Rong L, Panzai S 2013 *Optics Express* **21** 19568
- [25] Wang Y, Wang D, Zhao J, Yang Y, Xiao X, Cui H 2011 *Chinese Optics Letters* **9** 030901
- [26] Lü N 2006 *Fourier Optics* (China Machine Press) p245 (in Chinese) [吕乃光 2006 傅里叶光学 (机械工业出版社) 第 245 页]

Research on speckle denoising by lensless Fourier transform holographic imaging with angular diversity*

Wang Da-Yong Wang Yun-Xin[†] Guo Sha Rong Lu Zhang Yi-Zhuo

(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement & Control Technology and Instruments, Beijing 100124, China)

(Received 23 January 2014; revised manuscript received 13 March 2014)

Abstract

The signal-to-noise ratio and resolution of the reconstructed image is seriously influenced by speckle noise in digital holography, so it is essential to reduce the speckle noise and improve the image quality. Intensity correlation between two speckle patterns with the rectangle speckle spot is analyzed and deduced, and the minimal angular difference of illumination beams is given quantitatively under a special situation. A lensless Fourier transform holographic imaging system with angular diversity is designed based on the lens property, in which the direction of the wave can be changed by shifting the fiber instead of conventionally rotating the mirror, and the formor can change the direction of illumination with a fixed illumination size and location. Eighty one holograms with uncorrelated speckle patterns are recorded at different illumination angles by shifting the fiber. Then a digital reconstruction is achieved only by a fast Fourier transform, and the multiple reconstructed images are averaged. Experimental results show that the speckle contrast of the averaged reconstructed image can be reduced to 14.6% that from a single reconstructed image, and the signal-to-noise ratio is improved 6.9 times. This proposed digital holographic imaging method can suppress the speckle noise greatly, has a simple setup, and is easy to operate.

Keywords: digital holography, speckle noise, digital reconstruction, digital imaging processing

PACS: 42.40.-i, 42.30.Ms, 42.30.Va

DOI: 10.7498/aps.63.154205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077004, 61205010, 61307010), the National Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 1122004), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20121103120003), the Science and Technology Project of Beijing Municipal Commission of Education, China (Grant No. KM201310005031), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2013M540828), the Beijing Postdoctoral Sustentation Fund, China (Grant No. 2013ZZ-17), and the Special Matching Project of Local Area supported by the Central Committee of China.

† Corresponding author. E-mail: yxwang@bjut.edu.cn