

抑制散斑干涉测量中退相关的相位调制方法

蔡怀宇 郭震东* 黄战华 李青青

天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 退相关现象制约散斑干涉测量的实现。为了增加散斑场的相关性,抑制退相关,提出一种使用三次相位板进行相位调制的方法。通过分析散斑场相关性与散斑尺寸的关系,阐述了相位调制通过扩展散斑尺寸而抑制退相关的机理,仿真验证了方法的有效性。在此基础上设计了相位调制散斑干涉测量系统,其物光光路采用 $4f$ 系统结构,可在相位面处放置三次相位板方便地进行相位调制。对比实验结果表明:经相位调制的散斑场横向相关尺寸提升约1.7倍,纵向相关尺寸提升约2.5倍,有效抑制了散斑干涉测量中退相关的发生,能够获得良好干涉条纹的纵向相干区域扩展约2.5倍,提升了散斑干涉条纹局部对比度。

关键词 测量;干涉测量法;退相关;散斑尺寸;相位编码调制;立方相位板

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.041203

Phase Modulation Method to Suppress Decorrelation Phenomenon in Speckle Pattern Interferometry Measurement

Cai Huaiyu Guo Zhendong Huang Zhanhua Li Qingqing

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, Collage of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Decorrelation of speckle patterns restricts the implementation of speckle pattern interferometry. A method to increase the speckle correlation and to suppress the decorrelation phenomena is proposed by using a cubic phase mask for the phase modulation. The relationship between the speckle correlation and speckle sizes is analyzed, and the mechanism is elaborated that the phase modulation suppresses the decorrelation of speckle patterns. The feasibility of the method of phase modulation is verified by simulation. Then the measurement system of phase modulation speckle pattern interferometry is setup. Object lights transmit through a $4f$ system with a cubic phase mask on the phase surface, therefore the phase modulation can be conveniently achieved. The results of contrast experiments show that the transverse correlation size and the longitudinal correlation size of modulated speckle patterns can be increased by about 1.7 and 2.5 times, respectively. The decorrelation of speckle patterns can be effectively suppressed. Moreover, the correlation area of speckle pattern interferometry, in which well-observable fringes are obtained, can be increased by about 2.5 times, and the partial contrast of fringes in speckle pattern interferometry can be enhanced.

Key words measurement; interferometry; decorrelation; speckle size; phase encoding modulation; cubic phase mask

OCIS codes 120.3180; 220.4830; 030.6140; 110.7348

1 引言

散斑干涉技术用于散射物体微形变测量^[1-4],具有非接触、高精度、高灵敏度等优点,已经广泛应用在航空、航天、机械和材料等领域。其测量的基本原理是利用形变前后像空间干涉散斑场所具有的相关性,通过相加、相减或相关运算,得到散斑干涉条纹图,然后对其进行光强或相位分析获得物体形变信息。当物体形

收稿日期: 2015-11-05; 收到修改稿日期: 2015-11-15; 网络出版日期: 2016-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(60677033, 61275009)

作者简介: 蔡怀宇(1965—),女,博士,教授,主要从事光电检测技术及信息光学等方面的研究。

E-mail: hycail@tju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: q1247891940@163.com

变增加时,形变前后像空间散斑场的相关性降低,散斑干涉条纹对比度下降;当物体形变增大,直至超过散斑相关尺寸时,形变前后散斑场不再具有相关性,散斑干涉条纹将完全消失,这种现象被称为退相关^[6]。研究表明,退相关现象影响散斑干涉条纹对比度以及测量范围^[6],是制约散斑测量的最主要因素^[7]。因此,为了提升测量的准确性,扩展散斑干涉测量应用范围,应有效避免退相关现象的发生。

散斑干涉场的相关性与散斑相关尺寸大小有直接关系,散斑相关尺寸越大,对应散斑干涉场的相关性越好,退相关现象越不容易发生,因此调制散斑相关尺寸成为抑制退相关的有效方法。国内外学者在调制散斑相关尺寸方面已经做了大量的研究工作,Ward等^[8]证明影响散斑相关尺寸的因素包括光源波长和相对孔径,光源波长越长、相对孔径越小,散斑相关尺寸越大。因此,可以通过减小光阑孔径、增加照明波长等改变光路结构的方法增加散斑相关尺寸。但是实际测量中,光学系统照明波长等结构参数基本固定,减小光阑孔径会同时降低进入系统的光通量,改变光场能量分布,对散斑场相关性提升有限。Li等^[9-10]通过仿真和实验说明,将照明光场类型由平面波变成高斯光束,不会有效增加散斑相关尺寸。Gundu等^[11]在光路中加入空间光调制器,对散斑场进行振幅调制,提升散斑纵向相关性近1倍,一定程度上起到抑制退相关的作用。但是振幅调制元件会吸收光能量,降低散斑干涉条纹的图像质量。研究表明,具有幂律关系的分形散斑,其空间相关函数具有较长的拖尾,可以用于增加散斑干涉测量范围^[12]。但是在产生分形散斑的过程中使用透射率较低的幂律滤波器降低了分形散斑场强度,使用传统探测器难以获取图像。Funamizu等^[13]通过理论和实验证明,采用全息的方法可以以较小的光能损失产生像面分形散斑场,用于扩大散斑干涉测量范围。但是引入全息技术增加了实验系统的复杂性。

针对以上调制方法的不足,本课题组借鉴前期波前编码成像原理,将三次相位板用于散斑干涉场调制,提出一种使用三次相位板进行相位调制的方法。该方法在不改变光学系统主要结构以及参数的情况下能够增大散斑相关尺寸,从而提高散斑干涉场相关性,达到抑制退相关现象的目的。

2 相位调制抑制退相关机理

2.1 散斑场退相关与散斑相关尺寸

散斑场的相关性,即散斑场中两点关联程度。通常使用强度相关系数 μ_{12} 来表示,其取值范围在[0,1]之间,数值越大表明散斑场的相关性越强,数值为“0”表明散斑场完全退相关。实际应用中,散斑场相关系数计算公式为^[14]

$$\mu_{12} = \frac{\sum_m \sum_n [I_1(m,n) - \langle I_1 \rangle][I_2(m,n) - \langle I_2 \rangle]}{\sqrt{\sum_m \sum_n [I_1(m,n) - \langle I_1 \rangle]^2 \sum_m \sum_n [I_2(m,n) - \langle I_2 \rangle]^2}}, \quad (1)$$

式中 $I_1(m,n), I_2(m,n)$ 分别代表进行相关计算的散斑场 (m,n) 位置处的强度, $\langle \rangle$ 为系综平均。(1)式表明,散斑场 $I_1(m,n), I_2(m,n)$ 重合区域越多,相关性越强。

从微观结构考虑,散斑的空间分布呈椭球状,在沿光轴以及垂直光轴的方向上各有一定长度,分别称为散斑纵向尺寸和横向尺寸^[15]。散斑在 xoz 面上的分布如图1所示,其中 oz 表示光轴, ε, γ 分别为散斑纵向、横向相关尺寸。若物体形变引起散斑场纵向位移为 Δz ,则形变前散斑 $S_1 \sim S_3$ 形变后移动到 $S'_1 \sim S'_3$ 位置。

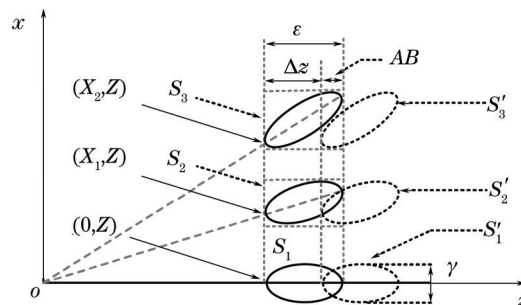


图1 xoz 平面散斑微观示意图

Fig.1 Schematic of micro speckle in xoz -plane

由图1可知,散斑干涉测量中,形变会导致散斑颗粒分布发生变化,只有在形变前后的散斑重叠区域(纵向深度AB区域),散斑场具有相关性,才有可能发生干涉。形变前后散斑颗粒的重合程度决定散斑干涉场的相关性,形变小到可以忽略不计,即 $\Delta z \approx 0$ 时,形变前后散斑颗粒分布变化近似于“0”,根据(1)式可求得 $\mu_{12} = 1$;形变量增加将降低散斑颗粒重合程度,散斑场相关性随之下降,当形变超出散斑相关尺寸,即 $\Delta z = \varepsilon$ 时,可得 $\mu_{12} = 0$,出现完全“退相关”现象;当 $0 < \Delta z < \varepsilon$ 时,出现退相关区域,纵向深度为 Δz ,在散斑相关区域AB(纵向深度为 $\varepsilon - \Delta z$)中, $0 < \mu_{12} < 1$,此区域任意 z 坐标面上,近轴相关系数不为零,能够出现干涉条纹,但全视场范围内相关度值并不相同,轴外散斑的相关系数比轴上散斑相关系数小,即越远离光轴,散斑的退相关现象越明显,可能造成整个坐标面上出现干涉条纹对比度随视场增大而递减、甚至边缘干涉条纹完全消失的现象。由以上分析可知,若通过散斑调制方法,使散斑场的纵向尺寸和横向尺寸增大,对应于相同的形变量 Δz ,相关区域深度增加,且在相关区域中由于散斑的重叠程度增加,其相关系数 μ_{12} 增大,干涉条纹的对比度得到提高,换言之,干涉测量中能够获得相同对比度的干涉条纹所允许的形变量增大,即量程增大。

2.2 相位调制方法抑制退相关

相位调制方法提高散斑场相关性、抑制退相关是通过增大散斑相关尺寸来实现的。根据傅里叶光学理论^[16],光学系统像方场分布 $U(x, y)$ 是物方场分布 $U(\xi, \eta)$ 与光学系统脉冲响应函数 $h(x, y)$ 的二维卷积

$$U(x, y) = \iint_{\xi\eta} U(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta. \quad (2)$$

物方散斑场可以看作是无数强度、相位随机的点光源组合,系统脉冲响应函数 $h(x, y)$ 在像空间的分布可以看作是经光学系统变换后的客观散斑,则函数 $h(x, y)$ 在沿轴向和垂直于轴方向上第一极小值之间的距离与散斑尺寸相关。 $4f$ 系统脉冲响应函数可以表示为

$$h(x, y, z) = A \frac{\exp(ikz)}{z} \iint_{uv} P(u, v) \exp\left[-\frac{ik}{2}\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z}\right)(u^2 + v^2)\right] \exp\left[\frac{ik}{f}(xu + yv)\right] dudv, \quad (3)$$

式中 $P(u, v)$ 代表光瞳函数, A 代表比例系数, z 为像距,由透镜焦距 f 和离焦量 Δf 组成; k 为波数,设入射波长为 λ ,则 $k = 2\pi/\lambda$ 。将三次相位板^[17-18]置于孔径光阑处,相应光瞳函数可以表示为

$$P(u, v) = \exp[i\alpha(u^3 + v^3)], \quad (4)$$

式中 α 为三次相位板参数, (u', v') 为归一化光瞳面坐标。将(4)式代入(3)式即可得到相位调制系统的脉冲响应函数:

$$h(x, y, z) = A \frac{\exp(ikz)}{z} \iint_{uv} \exp[i\alpha(u^3 + v^3)] \exp\left[-\frac{ik}{2}\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z}\right)(u^2 + v^2)\right] \exp\left[\frac{ik}{f}(xu + yv)\right] dudv. \quad (5)$$

由于(5)式在 $x(u)$ 、 $y(v)$ 方向是可分离的,为简化讨论,(5)式可以化简为一维形式

$$h(x, z) = A \frac{\exp(ikz)}{z} \int_u \exp(i\alpha u^3) \exp\left[-\frac{ik}{2}\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z}\right)u^2\right] \exp\left(\frac{ik}{f}xu\right) du. \quad (6)$$

根据(6)式计算一维脉冲响应函数(PSF)强度归一化分布,如图2所示,其中设照明波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$,透镜焦距 $f = 80 \text{ mm}$,三次相位板参数 $\alpha = 69$,孔径光阑 $D = 12 \text{ mm}$ 。

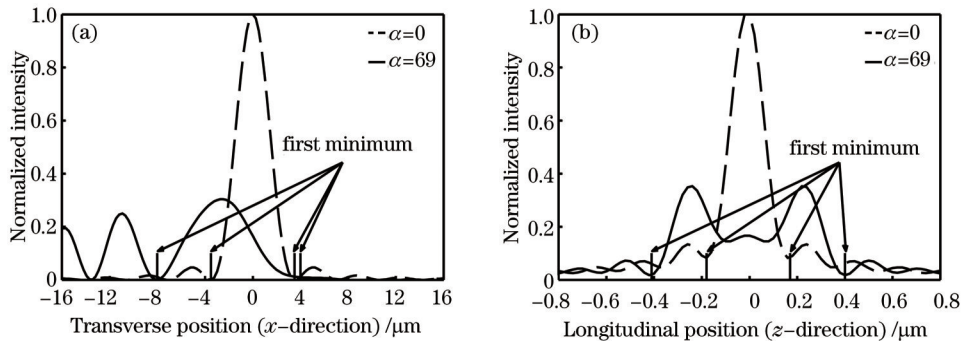


图2 一维脉冲响应函数归一化强度。(a) x -方向;(b) z -方向

Fig.2 Normalized intensity of one dimensional impulse response function. (a) x -direction; (b) z -direction

由图2可见,在垂直于轴方向上(x -方向)相比调制前一阶零点宽度增加,经调制后展宽约1.7倍;在沿轴方向上(z -方向)一阶零点展宽约2.5倍,该脉冲响应作用于物方散斑场可以增大像空间散斑的相关尺寸。

为验证相位调制方法能够有效提高散斑场相关性,构建如图3所示模型进行仿真研究。1) 依据自由空间衍射和透镜、相位板的相位变换作用,依次将物面上的散斑场 u_o 变换到像面上,得到像方散斑场 u_m ; 2) 分别沿轴移动 i 个间隔 Δz 、垂直于轴移动 j 个间隔 Δx , 计算得到对应散斑场分布 u_i 和 u_j ; 3) 根据(1)式计算得到各个面 u_j 、 u_i 与像面散斑分布 u_m 的相关系数,如图4所示。其中选用参数依然为照明波长 $\lambda=532$ nm, 透镜焦距 $f=80$ mm, 三次相位板参数 $\alpha=69$, 孔径光阑 $D=12$ mm。未添加相位调制 $4f$ 系统散斑横向相关尺寸 γ 、纵向相关尺寸 ε 理论值计算公式为^[19]

$$\gamma = \lambda \frac{f}{D}, \quad \varepsilon = 7.31\lambda \left(\frac{f}{D} \right)^2. \quad (7)$$

根据(7)式计算得到 $\gamma=3.55$ μm 、 $\varepsilon=0.17$ mm。

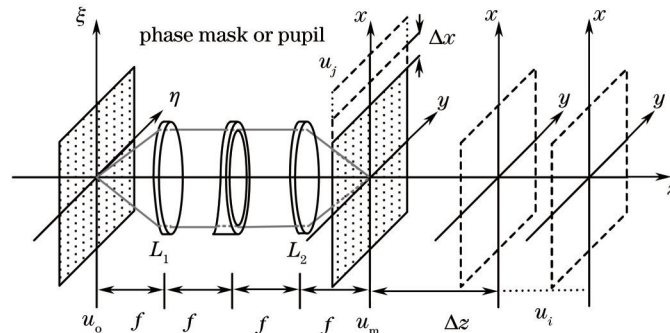


图3 仿真模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of simulation model

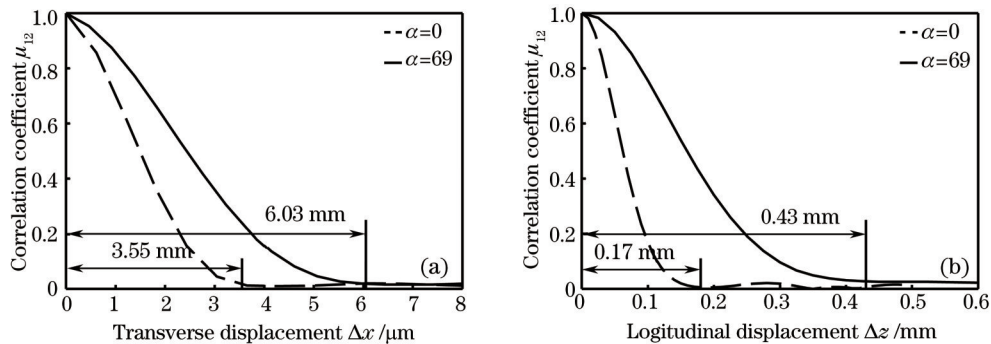


图4 相关系数-位移曲线。(a) 横向; (b) 纵向

Fig.4 Curves of correlation coefficients-displacement. (a) Transverse; (b) longitudinal

从图4中可以看出,添加相位调制前,散斑场横向、纵向相关系数曲线[见图4(a)、图4(b)中虚线]各自在大约 3.55 μm 和 0.17 mm 处降至平稳,可以认为相位调制前散斑场横向相关尺寸为 3.55 μm ,纵向相关尺寸为 0.17 mm,与理论值相符。同理可知,经相位调制的散斑场横向相关尺寸为 6.03 μm ,纵向相关尺寸为 0.43 mm,比调制前各自增加1.7倍和2.5倍,同分析图2中脉冲响应函数展宽得到的结论一致,故可以认为相位调制有效增加了散斑相关尺寸。

3 相位调制散斑干涉系统实验与分析

构建相位调制散斑干涉测量系统,原理如图5(a)所示。光源发出的光经扩束准直入射到偏振分光棱镜(PBS),分成振动方向相互垂直的物光和参考光。在物光光路中引入 $4f$ 系统结构,光阑设置在其对称中心处,便于放置相位板进行相位调制。在物光和参考光路中分别加入偏振方向相同的偏振片 P_1 、 P_2 ,使得经被测散射物体反射光束能够与漫射透射参考光经分光棱镜(BS)后相遇发生干涉。通过调整偏振片 P_0 的方向可以调节物光和参考光的强度比,有利于获得对比度最好的散斑干涉条纹。实物图如图5(b)所示。系统基本参数为光源波长 532 nm, $4f$ 系统透镜焦距 $f=80$ mm,三次相位板参数 $\alpha=69$,孔径 $D=12$ mm。

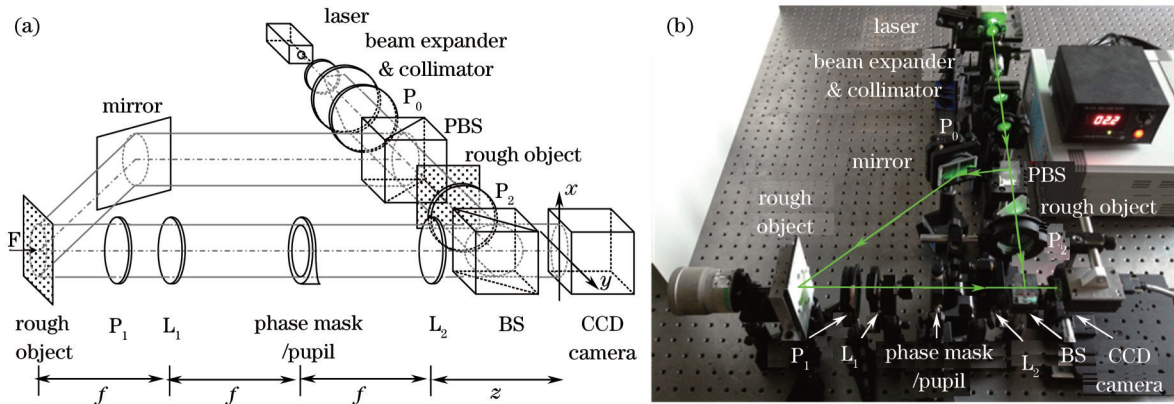


图5 相位调制散斑干涉测量系统。(a) 光路图; (b) 实物图

Fig.5 Measurement system of phase modulation speckle pattern interferometry.

(a) Beam path diagram; (b) physical map

实验中通过施加外力获得形变后散斑干涉场,与形变前散斑干涉场相减得到散斑干涉条纹,然后采用沿光轴方向移动CCD相机的方式增加等效形变,获得散斑干涉场,并与形变前散斑干涉场相减,检测干涉条纹,直至产生退相关现象。具体步骤为:

- 1) 记录形变前像方散斑场分布 u_0 ;
- 2) 给物体施加一定形变,记录形变后像方散斑场分布 u_1 , u_0 与 u_1 相减获得散斑干涉条纹;
- 3) 沿光轴方向以步长 Δ 移动 CCD 相机,记录对应位移位置处形变后像方散斑场分布 u_i , u_0 与 u_i 相减获得散斑干涉条纹;
- 4) 重复步骤3),直至条纹消失为止。定义条纹消失时相机移动距离为相干区间纵向深度。

施加相位调制后,在相同条件下重复上述实验,进行对比研究。

3.1 模拟结果与分析

针对相位调制前、后两种情况,基于图5(a)实验光路,通过模拟随机光场沿自由空间衍射和透镜、相位板的相位变换,分别得到形变前干涉光场 u_0 ,形变后每个纵向位移间隔 $80 \mu\text{m}$ 处的6个干涉光场 u_i ($i=0, \dots, 5$), u_0 分别与 u_i 相减后得到散斑干涉条纹,如图6所示。

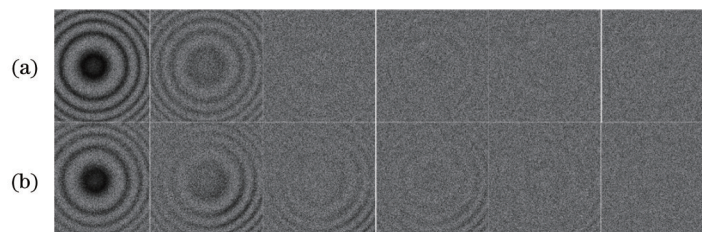


图6 不同离焦位置处的模拟散斑干涉条纹图。(a) 未调制; (b) 加调制

Fig.6 Simulated digital speckle pattern interferometry fringes at different defocused distances.

(a) Without modulation; (b) with modulation

由图6可见,随着像面纵向偏移的增加,散斑干涉条纹对比度下降,干涉条纹逐渐模糊至消失,出现退相关现象。但未经相位调制时,能够获得较为清晰的散斑干涉条纹的轴向范围只有 $160 \mu\text{m}$,经过相位调制后散斑干涉条纹数目、位置不变,对比度提高,能够获得较为清晰的散斑干涉条纹的轴向范围约为 $400 \mu\text{m}$,提升约2.5倍。

3.2 实验结果与分析

按图5(b)搭建实验系统,选用PointGrey公司生产的GRAS系列CCD相机记录散斑干涉场,其像素大小为 $6.45 \mu\text{m}$ 。相机安装在连胜公司LSDP-300FG微位移平台上,可沿轴作精密位移,最小位移量为 $2.5 \mu\text{m}$ 。针对相位调制前、后两种情况,分别获得形变前干涉光场 u_0 ,形变后每个纵向位移间隔 $80 \mu\text{m}$ 处的6个干涉光场 u_i ($i=0, \dots, 5$), u_0 分别与 u_i 相减后得到散斑干涉条纹,如图7所示。

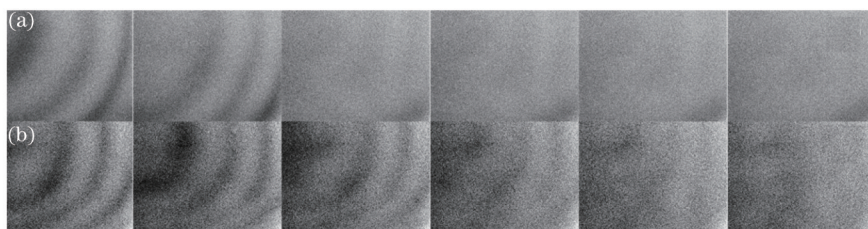


图7 不同离焦位置处的散斑干涉条纹图。(a) 未调制; (b) 加调制

Fig.7 Digital speckle pattern interferometry fringes at different defocused distances.

(a) Without modulation; (b) with modulation

由图7可见,随着像面纵向偏移的增加,散斑干涉条纹逐渐模糊至消失。未经相位调制散斑干涉场相关区间约 $160\ \mu\text{m}$,添加相位调制后散斑干涉条纹数目、位置不变,对比度提高,相关区间约 $400\ \mu\text{m}$,扩展约2.5倍。与仿真结果一致。

实验表明,随着像面纵向偏移的增加, u_o 、 u_i 之间相关性下降,条纹对比度下降。当像面纵向偏移超过散斑相关尺寸时, u_o 、 u_i 之间相关系数为“0”,退相关现象出现,干涉条纹消失。由于相位调制增大了散斑的相关尺寸,提高了散斑场的相关性,因此能够扩展相干区域,提升散斑干涉条纹对比度。实际测量中,由于光源、接收器性能以及噪声的影响,散斑干涉条纹消失时形变前后散斑场相关系数往往不为“0”,所以实际测量得到的有效相干区域会小于散斑相关尺寸。

4 结 论

在不改变光学系统主要结构及参数的情况下,将三次相位调制应用到散斑干涉测量当中,能够有效增加散斑尺寸,起到提高散斑场相关性、抑制退相关的作用。通过分析散斑场相关性与散斑尺寸的关系,阐述了相位调制抑制退相关的机理,仿真实验证明了该方法可以有效增加散斑场的相关性。在此基础上设计了物光光路,采用 $4f$ 系统结构的相位调制散斑干涉测量系统,对相位调制方法进行对比实验研究。结果表明,相位调制后散斑场横向相关尺寸提升约1.7倍,纵向相关尺寸提升约2.5倍,散斑干涉测量中获得的良好干涉条纹的纵向相干区域扩展约2.5倍,散斑干涉条纹局部对比度提升。工程实践中,应用相位调制方法可以提升散斑干涉条纹图像质量,扩大散斑干涉测量范围。由于相位调制可以有效增加散斑横向相关尺寸,今后将进一步研究相位调制对剪切散斑干涉测量的影响,扩大相位调制的应用范围。

参 考 文 献

- 1 Dai Xiangjun, Shao Xinxing, Geng Zhencen, *et al.*. Vibration measurement based on electronic speckle pattern interferometry and radial basis function[J]. Opt Commun, 2015, 355: 33-43.
- 2 Li Xiangyu, Huang Zhanhua, Zhu Meng, *et al.*. Measurement of transient deformation using high-speed temporal speckle pattern interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0612002.
李翔宇, 黄战华, 朱 猛, 等. 瞬态形变的高速时域散斑干涉测量[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0612002.
- 3 Qian Xiaofan, Rao Fan, Lin Chao, *et al.*. Speckle noise reduction algorithm based on principle of shearing interferometry [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0708003.
钱晓凡, 饶 帆, 林 超, 等. 基于剪切干涉原理的散斑噪声降噪算法[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0708003.
- 4 Sun Ping, Fan Xiangju, Wang Xinghai. Three-dimensional electronic speckle pattern interferometry with carrier modulation by using large-shearing block prism[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412012.
孙 平, 范香菊, 王兴海. 基于大错位方棱镜的三维载频电子散斑干涉技术[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0412012.
- 5 Sivaramakrishnan A, Lloyd J P, Hodge P E, *et al.*. Speckle decorrelation and dynamic range in speckle noise limited imaging [J]. Astrophysical Journal Letters, 2002, 581(1): L59-L62.
- 6 Huntley J M. Random phase measurement errors in digital speckle pattern interferometry[C]. SPIE, 1997, 26: 131-150.
- 7 Sjödal M. Calculation of speckle displacement, decorrelation, and object-point location in imaging systems[J]. Appl Opt, 1995, 34(34): 7998-8010.
- 8 Ward J E, Kelly D P, Sheridan J T. Three-dimensional speckle size in generalized optical systems with limiting apertures [J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2009, 26(8): 1855-1864.

- 9 Li D, Kelly D P, Sheridan J T. Three-dimensional static speckle fields. Part I. Theory and numerical investigation[J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(9): 1896–1903.
- 10 Li D, Kelly D P, Sheridan J T. Three-dimensional static speckle fields. Part II. Experimental investigation[J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(9): 1904–1908.
- 11 Gundu P N, Hack E, Rastogi P. Superspeckles: A new application of optical superresolution[J]. *Opt Express*, 2005, 13(17): 6468–6475.
- 12 Vozumi J, Ibrahim M, Asakura T. Fractal speckles[J]. *Opt Commun*, 1998, 156(4–6): 350–358.
- 13 Funamizu H, Uozumi J, Aizu Y. Digital holographic fractal speckle[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(3): 35704–35711.
- 14 Cai Huaiyu, Jiao Mengjin, Huang Zhanhua, *et al.*. A phase encoding modulation method to increase the longitudinal correlation of speckle fields[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 101203.
蔡怀宇, 焦梦锦, 黄战华, 等. 提高散斑场纵向相关性的相位编码调制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 101203.
- 15 Li D, Kelly D P, Kirner R, *et al.*. Speckle orientation in paraxial optical systems[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(4): A1–A10.
- 16 Goodman J W. Introduction to Fourier Optics[M]. Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi, *et al.*. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 14–16.
古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011: 14–16.
- 17 Le Vannhu, Fan Zhigang, Duong Quocdung. To extend the depth of field by using the asymmetrical phase mask and its conjugation phase mask in wavefront coding imaging systems[J]. *Appl Opt*, 2015, 54(12): 3630–3634.
- 18 Guo Xiaohu, Zhao Yuejin, Dong Liqun, *et al.*. Analysis of effect of phase plate decenter on wavefront coding imaging[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0809002.
郭小虎, 赵跃进, 董立泉, 等. 相位板偏心对波前编码系统的成像影响分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0809002.
- 19 Javier G, Zeev Z, Pascuala G M, *et al.*. Three-dimensional mapping and range measurement by means of projected speckle patterns[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(16): 3032–3040.

栏目编辑: 何卓铭