

提高散斑场纵向相关性的相位编码调制方法

蔡怀宇 焦梦锦* 黄战华 郭震东

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 散斑在轴向的退相关现象是制约散斑干涉测量适用性的关键问题之一,为了提高散斑场的纵向相关性,从而提高散斑干涉图像的条纹对比度,扩大物体离面形变的测量范围,提出一种对散斑场进行相位编码调制的方法,即将波前编码技术扩展景深的方法用于散斑场编码,在孔径光阑位置上放置立方型相位板实现相位调制。首先分析了该编码调制方法用于提高散斑场纵向相关性的可行性,然后基于 $4f$ 系统模拟仿真并实验验证了通过相位编码调制提高编码散斑场的纵向相关性的实际效果。结果表明,编码后散斑的纵向尺寸从 0.17 mm 提高到 0.4 mm ,大约提高了2.5倍。

关键词 测量;纵向相关性;散斑尺寸;相位编码调制;立方型相位板

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.101203

A Phase Encoding Modulation Method to Increase the Longitudinal Correlation of Speckle Fields

Cai Huaiyu Jiao Mengjin Huang Zhanhua Guo Zhendong

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

Abstract The axial decorrelation of speckle patterns is one of the key problems which restrict the use of speckle interferometry. A method of speckle field phase encoding modulation is proposed to increase the speckle longitudinal correlation so that the contrast of the speckle interference fringes can be improved, and then the measurement range of the object surface deformation can be extended. The wavefront coding technique is used to code the speckle fields and a cubic phase mask is set at the position of aperture. The feasibility of this method in increasing the longitudinal correlation of speckle fields is analyzed firstly. The effect that the cubic phase mask in the $4f$ system can effectively increase the longitudinal correlation of coded speckle field is validated by simulation and experiment respectively. The results show that the longitudinal speckle size increases from 0.17 mm to 0.4 mm and increases by about 2.5 times.

Key words measurement; longitudinal correlation; speckle size; phase encoding modulation; cubic phase mask

OCIS codes 120.3180; 220.4830; 030.6140; 110.7348

1 引言

激光散斑干涉测量技术已经广泛应用于物面应变^[1-3]、位移等物理量的测量^[4-5],其基本原理是利用形变或位移前后两幅散斑分布图样的相关性。由于散斑颗粒在微观上具有三维尺寸,当形变或位移过大,超过散斑的相关尺寸时,变形前后的散斑场就不再具有相关性。这种随空间分离的散斑场相关性降低的现象称为“退相关”^[6]。退相关使得接收面上形变前后图像对比度降低,影响测量结果^[7]。增大散斑的纵向相关尺寸,能够提高散斑纵向相关性,扩大离面位移和形变的测量范围,有效提高测量结果的准确性和适用性。

研究表明,散斑场的相关性与散斑场统计尺寸直接相关^[8]。1986年,Yoshimura^[9]采用互相关函数的描述方法得到了散斑的统计尺寸表达式,开始了对散斑相关性的研究。2011年,Li等^[10-11]分别从理论推导和实

收稿日期: 2014-05-17; 收到修改稿日期: 2014-05-30; 网络出版日期: 2014-08-28

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: tdjmj0371@126.com

验证这两方面系统地总结了三维散斑尺寸的计算过程。在这些文献中,对散斑相关尺寸的研究集中于不同的照明光的结构和成像光路中的散斑统计尺寸,因此提高散斑相关性主要通过调整光路结构参数,改变散斑相关尺寸的方法实现。但在实际测量条件下,光路结构基本固定,提高散斑的相关性十分困难。近几年国外一些学者对编码散斑开展了相应研究^[12-14],Gundu等^[15]利用空间光调制器作为振幅编码载体,使散斑的纵向相关尺寸增大了1倍。国内至今尚未发现相关报道。

振幅调制能够提高散斑场的纵向相关性,但调制元件会吸收光能量。本文提出一种相位编码调制方式,能够有效克服振幅编码的不足。在 $4f$ 系统的频谱面放置连续型三次相位板对原始散斑场进行编码。实验结果表明,相位编码散斑场的纵向相关性比原始散斑场相关性提高约2.5倍。

2 散斑纵向相关性的相位编码调制原理

2.1 散斑的相关性与散斑纵向尺寸

散斑的相关性即散斑场在空间两点的关联程度,由互相关函数表示。实际应用中用强度相关系数来表征散斑场的相关性,其取值位于 $[0, 1]$ 范围内。强度相关系数是散斑场相关性的直观表示,因此本文将强度相关系数作为评价编码调制有效性的重要参数。当照明光为高斯光束时,强度相关系数的表达式为^[16-17]

$$|\mu(r_1, r_2)|^2 = \frac{1}{1 + (\varepsilon/l_z)^2} \exp \left\{ - \left(\frac{1}{r_s} \right)^2 \left[\left(\frac{\varepsilon}{z_1} x_1 - \gamma \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{z_1} y_1 - \delta \right)^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 r_1, r_2 分别为空间两点的三维坐标, z_1, z_2 分别为该两点的轴向坐标(z 轴), $\gamma, \delta, \varepsilon$ 分别为两幅散斑图在 x, y, z 方向的相对位移量, $l_z = 4z_1 z_2 / (w^2 k)$, $r_s = 2z_2 \sqrt{1 + (\varepsilon/l_z)^2} / (wk)$, w 为高斯光束宽度, k 为波数。当横向位移 γ, δ 为零时可以得到纵向强度相关系数,它仅是 ε 的函数。随着 ε 的增大, $|\mu(r_1, r_2)|^2$ 减小,散斑的纵向相关性降低。因此,要提高散斑纵向相关性,就要改变 $|\mu(r_1, r_2)|^2$ 的形式,使其随 ε 增大的下降变缓。

从微观上看,散斑在三维空间呈一椭球体,沿光轴方向有一定的纵向长度,称为散斑的纵向尺寸。当物体表面发生形变或位移时,记录物体表面信息的散斑图样也发生改变,从微观角度,这种改变可解释为同一个散斑颗粒的位置发生改变,如图1所示,散斑颗粒呈现交叠状态。当散斑颗粒完全重合时,强度相关系数为1,此时相关性最强,物体表面无形变或位移。当散斑颗粒完全分离时,强度相关系数为0,此时经过相加或相减运算得到的散斑干涉图无条纹。因此,提高散斑的纵向相关性,其实是增大散斑在光轴方向的尺寸,延长散斑图样出现完全退相关现象的距离,从而扩大散斑干涉测量的范围。

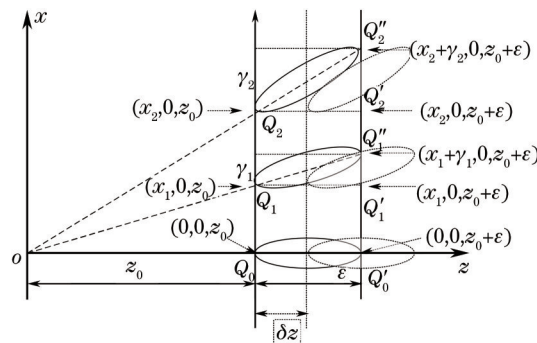


图1 xoz 平面散斑微观示意图

Fig.1 Schematic of micro speckle in the xoz -plane

从图1可以看出,轴外散斑的纵向退相关现象要比轴上散斑明显,越远离光轴,散斑的退相关现象越明显,即强度相关系数曲线下降得更快。可见观察点的距离和角度都会影响散斑的相关性,此外,由于散斑是相干光照条件下所观察到的现象,因此照明光的相干性也会对散斑场的相关性产生影响。

2.2 相位调制编码提高纵向相关性的可行性

提高散斑的纵向相关性,可通过相位调制编码增大散斑的纵向相关尺寸来实现。在传统成像光学系统中,像面光场复振幅是物面复振幅和脉冲响应函数的二维卷积,设透镜的焦距为 f ,在非涅耳近似条件下,

脉冲响应函数可表示为

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

式中 P 为孔径函数, (u,v) 为光瞳面坐标, K 为比例系数, z 为像距, 由透镜焦距和离焦量组成, k 为波数, 设入射光波长为 λ , 则 $k = 2\pi/\lambda$ 。

由(2)式可知, 脉冲响应函数可以看做光瞳函数与一个 e 指数函数 $\exp\left[-i\frac{k}{2}\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z}\right)(u^2 + v^2)\right]$ 乘积的傅里叶变换。当观察面在像方焦平面上时, $z=f$, e 指数项为 1。当观察面在离焦位置时, 该项使得系统的点扩展函数(PSF)展宽。

根据傅里叶光学理论, 点扩展函数可看成理想物点的像点。若将物空间散斑看成物点, 则其 $h(x,y,z)$ 在像空间的分布可近似理解为像空间散斑的尺寸大小。由于(2)式在 x,y 方向是可分离的, 为简化讨论, (2)式可化简为一维函数表达式:

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

借鉴波前编码技术^[18], 选择最典型的三次相位板对散斑场进行相位调制, 相位板的数学表达形式为

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

式中 α 为三次相位板参数。将相位板置于系统的孔径光阑处, 系统的点扩展函数发生了改变, 其表达式为

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

简化为一维表达式

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

(4)式和(6)式分别表示传统成像系统和编码相位调制系统点扩展函数的一维沿轴分布, 采用数值分析的方法, 取透镜焦距均为 $f=80\text{ mm}$, 波长 $\lambda=532\text{ nm}$, 孔径光阑直径 $D=12\text{ mm}$, 当三次相位板参数 $\alpha=69$ 时, 得到一维 PSF 轴向归一化光强分布, 如图 2 所示。由图可知, 相位调制系统的点扩展函数一阶零点较未经相位调制的系统有明显提高, 大约提高 2.5 倍。实际上散斑在物空间也是具有一定长度的椭球体, 所以实际计算的散斑纵向尺寸应大于调制后点扩展函数的一阶零点值。

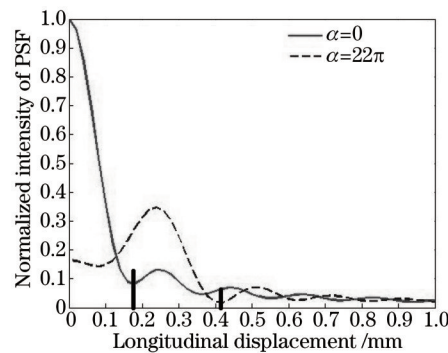


图 2 一维点扩展函数轴向归一化光强分布

Fig.2 One-dimension of normalized intensity of PSF in axial direction

采用相位编码方式对散斑场进行相位调制可以有效地提高散斑场空间三维相关性且不改变光学系统的其他参数, 经过编码后的散斑场分布虽然改变了散斑场原始信息, 但散斑干涉和散斑相关测量技术是“变化”的测量, 采用相减或相关运算得到形变或位移与原始信息本身无关, 所得结果只反映变化量。故相位调制技术可有效地应用于干涉散斑测量中。

3 仿真与实验

3.1 仿真计算

仿真实验光路系统如图3所示。激光经扩束准直后照射在表面粗糙的散射体上,形成散斑场。散斑场经 $4f$ 系统传输,由位于频谱面的三次相位板进行相位调制,并成像在电荷耦合元件(CCD)上。将CCD沿光轴方向进行平移,以此来探测像空间散斑的相关性。

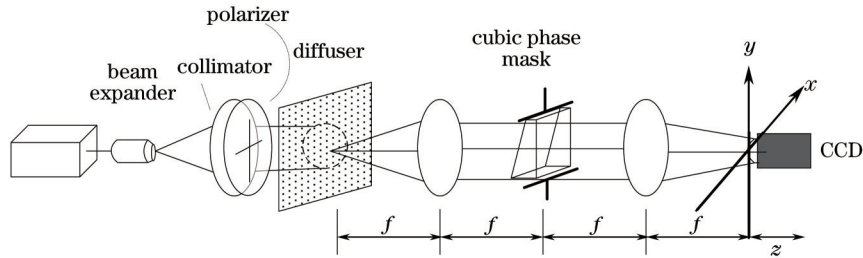


图3 编码散斑测量系统

Fig.3 Coded-speckle measurement system

仿真计算利用MATLAB软件实现,仿真流程如图4所示。

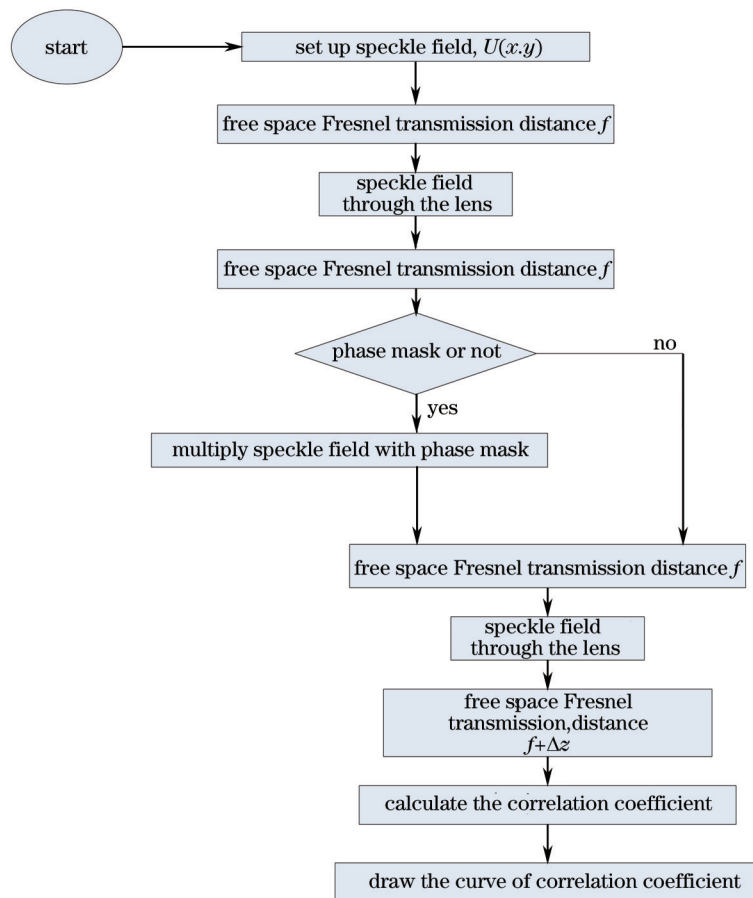


图4 仿真建模流程图

Fig.4 Flow chart of simulation

仿真时设定的光学系统中各个元件参数与点扩展函数归一化强度分布计算时的设置相同。散斑相关系数的计算公式为

$$r = \frac{\sum_m \sum_n [I_r(m,n) - \langle I_r \rangle] [I_{\text{def}}(m,n) - \langle I_{\text{def}} \rangle]}{\sqrt{\sum_m \sum_n [I_r(m,n) - \langle I_r \rangle]^2 \sum_m \sum_n [I_{\text{def}}(m,n) - \langle I_{\text{def}} \rangle]^2}}, \quad (7)$$

式中 $I_l(m,n)$ 和 $I_{del}(m,n)$ 分别为焦平面和离焦面上 (m,n) 位置处散斑图像的强度, $\langle \rangle$ 为系综平均。像平面每移动 0.01 mm 计算一次相关系数, 得到的仿真相关系数曲线如图 5 中虚线所示。同理计算出未加调制时相关系数曲线如图 5 中实线所示。

从图 5 可以看出, 未经相位板编码的散斑场相关系数曲线大约在 0.2 mm 处降至 0, 根据公式 $\varepsilon_s = 8cf^2/(\nu_0 D^2)^{[19]}$ (c 为光速, ν_0 为光波中心频率, D 为光瞳直径), 计算得到散斑纵向尺寸为 0.19 mm, 仿真结果与理论计算值基本一致。编码后的散斑场相关系数曲线的零点位置大约在 0.5 mm 处, 比原始散斑的纵向相关性提高了约 2.5 倍。该结果与上节中点扩散展数强度分布的计算对比结果一致。

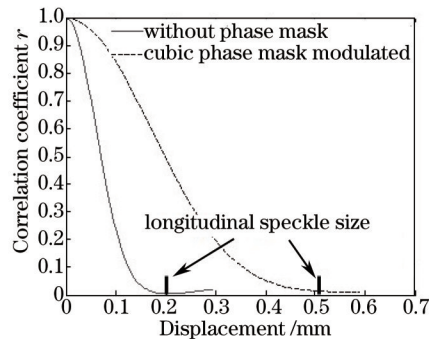


图 5 仿真计算结果

Fig.5 Simulation curves of longitudinal correlation coefficients

3.2 实验

在仿真基础上搭建图 6 所示实验系统。波长为 532 nm 的激光经过扩束和准直, 获得直径约 30 mm 的光束, 照射在毛玻璃上, 形成散斑场。散斑场经过 4f 系统成像在 CCD 上, 透镜焦距为 80 mm。在系统的孔径光阑处放置三次相位板, 面型参数 $\alpha = 69$ 。CCD 相机为 PointGrey 公司生产的 GRAS 系列, 由控制箱控制 CCD 的移动。实验得到的散斑相关系数曲线如图 7 所示。

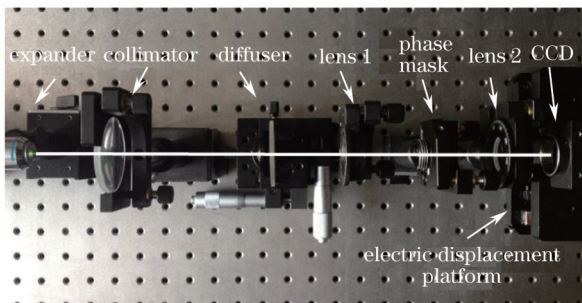


图 6 实验系统图

Fig.6 Experiment system

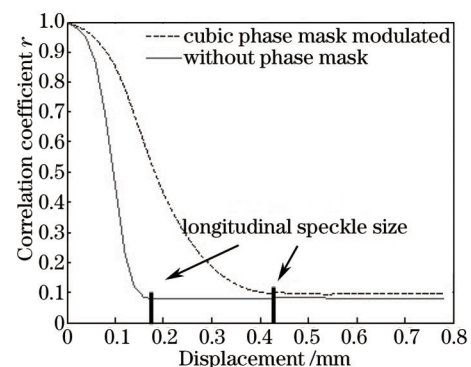


图 7 4f 系统编码散斑场纵向相关性实验结果

Fig.7 Experiment results of coded-speckle longitudinal correlation coefficients in the 4f system

未加相位板调制的散斑纵向相关曲线大约在 0.17 mm 离焦位置处下降至平缓, 可认为散斑的纵向尺寸就是 0.17 mm, 理论计算值为 0.19 mm, 实验结果与理论值基本一致。经过相位调制的散斑场, 其纵向尺寸约为 0.4 mm, 纵向相关性有了明显的提高。该结果与模拟结论基本一致。

4 结 论

将三次相位调制的方法应用于激光散斑场来提高散斑的纵向相关性, 对传统光学系统和相位编码调制光学系统的点扩展函数轴向光强分布进行了计算, 说明了相位编码调制扩大散斑纵向相关尺寸的可行性。在此基础上, 从模拟和实验两方面验证了波前编码方法能够提高散斑纵向相关性。实验结果表明, 经过相位编码调制的散斑场, 其纵向尺寸增大了约 2.5 倍。

参考文献

- 1 Arun Anand, Vani K Chhaniwal, Percival Almero. Shape and deformation measurements of 3D objects using volume speckle field and phase retrieval[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(10): 1522-1524.
- 2 Sun Ping, Fan Xiangju, Wang Xinghai. Three-dimensional electric 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.
- 3 Zhu Meng, Huang Zhanhua, Li Xiangyu, *et al.*. Spatial carrier speckle interferometry technique research based on Fresnel bi-prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912003.
朱猛, 黄战华, 李翔宇, 等. 菲涅耳双棱镜载频散斑干涉形变测量系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0912003.
- 4 M Sjodahl. Electronic speckle photography: Measurement of in-plane strain fields through the use of defocused laser speckle[J]. *Appl Opt*, 1995, 34(25): 5799-5808.
- 5 Chen Bingquan. Defect measurement based on rotating aperture-stroboscopic speckle interferometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(1): 76-79.
陈炳泉. 旋转孔径频闪散斑干涉法用于缺陷检测[J]. *中国激光*, 2007, 34(1): 76-79.
- 6 Nicolas Goudemand. Theoretical investigations on dual-beam illumination electronic speckle pattern interferometry [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(21): 5092-5106.
- 7 J M Huntley. Random phase measurement errors in digital speckle pattern interferometry[J]. *Opt Laser Engng*, 1997, 26 (2-3): 131-150.
- 8 Joseph W Goodman. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*[M]. Colorado: Roberts Company Publishers, 2006. 66-77.
- 9 Takeaki Yoshimura. Statistical properties of dynamic speckles[J]. *J Opt Soc Am A*, 1986, 7(3): 1032-1054.
- 10 Dayan Li, Damien P Kelly, John T Sheridan. Three-dimensional static speckle fields. Part I. Theory and numerical investigation[J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(9): 1896-1903.
- 11 Dayan Li, Damien P Kelly, John T Sheridan. Three-dimensional static speckle fields. Part II. Experimental investigation [J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(9): 1904-1908.
- 12 Percival F Almero, Steen G Hanson. Random phase plate for wavefront sensing via phase retrieval and a volume speckle field[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(16): 2979-2987.
- 13 D S Monaghan, U Gopinathan, G Situ, *et al.*. Statistical investigation of the amplitude encoding case of the double random phase encoding technique[J]. *J Opt Soc Am A*, 2009, 26(9): 2033-2042 .
- 14 D S Monaghan, G Situ, U Gopinathan, *et al.*. Analysis of phase encoding for optical encryption[J]. *Opt Comm*, 2008, 282 (4): 482-492.
- 15 Phanindra Narayan Gundu, Erwin Hack. Superspeckles: A new application of optical Superresolution[J]. *Opt Express*, 2005, 13(17): 6468-6475.
- 16 H Kogelnik, T Li. Laser beams and resonators[J]. *Proc IEEE*, 1966, 11(5): 1312-1329.
- 17 T Yoshimura, S Iwamoto. Dynamic properties of three dimensional speckles[J]. *J Opt Soc Am*, 1993, 10(2): 324-328.
- 18 E R Dowsk, W T Cathey. Extended depth of field through wavefront coding[J]. *Appl Opt*, 1995, 34(11): 1859-1866.
- 19 Nien-An Chang, Nicholas George. Speckle in the 4F optical system[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(4): A13-A20.