

激光双脉冲 DSPI 系统性能分析： 对比度及优化*

朱绍明 彭翔 张宗华 胡小唐

(天津大学精仪学院国家教委光电子信息工程开放实验室 天津 300072)

提要 分析了双脉冲激光数字散斑干涉系统中影响相关条纹图可见度的因素,相应地提出了获取高质量相关条纹图的优化方法。

关键词 脉冲 DSPI,系统性能,可见度优化

应用脉冲数字散斑干涉技术的关键问题在于获取高质量的散斑相关条纹图。事实上,相关条纹质量的好坏直接关系到条纹自动分析能否进行以及测量精度^[1-5]。本文分析了我们所建立的激光双脉冲数字散斑干涉系统中影响相关条纹可见度的主要因素,并针对这些因素提出获取优化相关条纹可见度的方法。

1 双脉冲散斑干涉相关条纹图可见度表达式

在文献[6]中,作者曾推导了理想情况下使用双脉冲散斑干涉相减模式获取反映物体变形信息的散斑相关条纹公式。在对实际系统进行性能分析时,还应该考虑到激光时间相干性、激光光强涨落、两幅散斑图的相关性等因素对相关条纹对比度的影响。令 $U_o(\vec{r}, t), U_r(\vec{r}, t)$ 分别为物光、参考光像面处复振幅(使用平滑参考光,参考文献[6]中的光路图),则像面(CCD靶面)上某点 $\vec{r} = (x, y)$ 在物体变形前后、时间间隔为 Δt 接收到的光强分别为

$$I_1(\vec{r}, t) = I_{o1}(\vec{r}, t) + I_{r1}(\vec{r}, t) + 2\Gamma \operatorname{Re}[U_{r1}^*(\vec{r}, t) U_{o1}(\vec{r}, t)] \quad (1)$$

$$I_2(\vec{r}, t + \Delta t) = I_{o2}(\vec{r}, t + \Delta t) + I_{r2}(\vec{r}, t + \Delta t) + 2\Gamma \operatorname{Re}[U_{r2}^*(\vec{r}, t + \Delta t) U_{o2}(\vec{r}, t + \Delta t)] \quad (2)$$

其中 $I_{oi}(\vec{r}, t) = U_{oi}^*(\vec{r}, t) U_{oi}(\vec{r}, t), i = 1, 2,$ 为物光光强
 $I_{ri}(\vec{r}, t) = U_{ri}^*(\vec{r}, t) U_{ri}(\vec{r}, t), i = 1, 2,$ 为参考光光强

Γ 为归一化时间相干函数, $\Gamma \leq 1$, 当干涉仪两臂光程相等时 $\Gamma = 1$ 。

对于第一幅干涉散斑图,从视频摄像机(CCD)输出的信号可写成

$$V_1(\vec{r}, t) = g[I_1(\vec{r}, t)] + V_e(\vec{r}, t) \quad (3)$$

其中, $g[I]$ 为摄像机视频增益,它是曝光量函数; V_e 为电子噪声。为简单起见,假定 V_e 与光信号无关,即二者统计独立。在一般情况下, $g[I]$ 为非线性函数,但对于偏离平均光强的微小量

* 国家自然科学基金资助项目(69378020)。

可以在工作点 $g[\langle I_1 \rangle]$ 附近用线性泰勒级数展开, 即

$$V_1(\vec{r}, t) = g[\langle I_1 \rangle] + g'[\langle I_1 \rangle][I_1(\vec{r}, t) - \langle I_1 \rangle] + V_{e1}(\vec{r}, t) \quad (4)$$

其中 $g'[\langle I_1 \rangle]$ 表示在工作点 $g[\langle I_1 \rangle]$ 处传递特性的梯度。在(1)式中, 条纹函数受到均值为零的随机载波的调制。为了得到相关信号, 首先利用高通滤波去掉背景噪声, 即

$$\Delta V_1(\vec{r}, t) = V_1(\vec{r}, t) - \langle V_1(\vec{r}, t) \rangle = (g')\Delta I_1(\vec{r}, t) + \Delta V_{e1}(\vec{r}, t) \quad (5)$$

其中 $\Delta I_1(\vec{r}, t) = I_1(\vec{r}, t) - \langle I_1 \rangle$; $\Delta V_{e1}(\vec{r}, t) = V_{e1}(\vec{r}, t) - \langle V_{e1} \rangle$ 。对(5)式所得的滤波信号采用平方律探测并在监视器上显示(为简单起见, 不写变量 \vec{r} 和 t), 根据(1)和(5)式, 有

$$\Delta V_1^2 = \{(g')\Delta I_{o1} + (g')\Delta I_{r1} + 2(g')\Gamma \text{Re}[U_{r1}^* U_{o1}] + \Delta V_{e1}\}^2 \quad (6)$$

其中, $\Delta I_{o1}(\vec{r}, t) = I_{o1}(\vec{r}, t) - \langle I_{o1} \rangle$; $\Delta I_{r1}(\vec{r}, t) = I_{r1}(\vec{r}, t) - \langle I_{r1} \rangle$ 。对(6)式取系综平均, 得

$$\langle \Delta V_1^2 \rangle = (g')^2(\sigma_{o1}^2 + \sigma_{r1}^2 + 2\Gamma^2 \langle I_{r1} \rangle \langle I_{o1} \rangle) + \sigma_{e1}^2 \quad (7)$$

其中, $\sigma_{o1}^2 = \langle \Delta I_{o1}^2 \rangle$, $\sigma_{r1}^2 = \langle \Delta I_{r1}^2 \rangle$, $\sigma_{e1}^2 = \langle \Delta V_{e1}^2 \rangle$ 分别为物光、参考光和电子噪声的均方差。(6)式右边所有交叉项的集平均均为零, 这是基于如下假设: 1) 电子噪声与光信号统计独立; 2) 参考光与物光统计独立; 3) 物光服从复圆型高斯分布。

对第二幅散斑图作相似处理, 得

$$V_2(\vec{r}, t) = g[I_2(\vec{r}, t)] + V_{e2}(\vec{r}, t) \quad (8)$$

$$\Delta V_2(\vec{r}, t) = V_2(\vec{r}, t) - \langle V_2(\vec{r}, t) \rangle = (g')\Delta I_2(\vec{r}, t) + \Delta V_{e2}(\vec{r}, t) \quad (9)$$

$$\Delta V_2^2 = \{(g')\Delta I_{o2} + (g')\Delta I_{r2} + 2(g')\Gamma \text{Re}[U_{r2}^* U_{o2}] + \Delta V_{e2}\}^2 \quad (10)$$

$$\langle \Delta V_2^2 \rangle = (g')^2(\sigma_{o2}^2 + \sigma_{r2}^2 + 2\Gamma^2 \langle I_{r2} \rangle \langle I_{o2} \rangle) + \sigma_{e2}^2 \quad (11)$$

其中

$$\Delta I_2(\vec{r}, t) = I_2(\vec{r}, t) - \langle I_2 \rangle; \quad \Delta V_{e2}(\vec{r}, t) = V_{e2}(\vec{r}, t) - \langle V_{e2} \rangle;$$

$$\Delta I_{o2}(\vec{r}, t) = I_{o2}(\vec{r}, t) - \langle I_{o2} \rangle; \quad \Delta I_{r2}(\vec{r}, t) = I_{r2}(\vec{r}, t) - \langle I_{r2} \rangle;$$

$$\sigma_{o2}^2 = \langle \Delta I_{o2}^2 \rangle; \quad \sigma_{r2}^2 = \langle \Delta I_{r2}^2 \rangle; \quad \sigma_{e2}^2 = \langle \Delta V_{e2}^2 \rangle$$

将两幅散斑图相减、平方、平均后得到 $\langle \Delta V^2 \rangle$ 。根据(5), (7), (9), (11)式以及前面所给出的三个统计条件假设即可得到

$$\begin{aligned} \langle \Delta V^2 \rangle = & (g')^2[\sigma_{o1}^2 + \sigma_{o2}^2 + \sigma_{r1}^2 + \sigma_{r2}^2 + 2\Gamma^2(\langle I_{r1} \rangle \langle I_{o1} \rangle + \langle I_{r2} \rangle \langle I_{o2} \rangle) - \\ & 2(\langle I_{o1} I_{o2} \rangle - \langle I_{o1} \rangle \langle I_{o2} \rangle) - 2(\langle I_{r1} I_{r2} \rangle - \langle I_{r1} \rangle \langle I_{r2} \rangle) + \\ & 4\Gamma^2 \text{Re} \langle U_{r1} U_{r2}^* U_{o1}^* U_{o2} \rangle] + \sigma_{e1}^2 + \sigma_{e2}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

令双脉冲曝光前后参考光、物光光强统计平均之比分别为 $p_r(\vec{r}, t)$, $p_o(\vec{r}, t)$, 即

$$p_r(\vec{r}, t) = \frac{I_{r2}(\vec{r}, t + \Delta t)}{I_{r1}(\vec{r}, t)} \quad (13)$$

$$p_o(\vec{r}, t) = \frac{\langle I_{o2}(\vec{r}, t + \Delta t) \rangle}{\langle I_{o1}(\vec{r}, t) \rangle} \quad (14)$$

并引入双脉冲物光振幅相关函数 $\gamma_{12}(\vec{r})$ 及条纹可见度 V_F , 其定义分别如下

$$\gamma_{12}(\vec{r}) = \frac{\langle U_{o1}^*(\vec{r}) U_{o2}(\vec{r}) \rangle}{(\langle I_{o1} \rangle \langle I_{o2} \rangle)^{1/2}} \quad (15)$$

$$V_F = \frac{\langle \Delta V^2 \rangle_{\max} - \langle \Delta V^2 \rangle_{\min}}{\langle \Delta V^2 \rangle_{\max} + \langle \Delta V^2 \rangle_{\min}} \quad (16)$$

根据(13)至(16)式, 得到条纹可见度的普遍表达式

$$V_F = \frac{4(p_o p_r)^{1/2} \Gamma^2 |\gamma_{12}|}{2(1 + p_o p_r) \Gamma^2 + (1 - 2p_o |\gamma_{12}|^2 + p_o^2)/R + (1 - p_r)^2 \gamma_{r1}^2 R + \gamma_e} \quad (17)$$

其中, $R = \langle I_{r1} \rangle / \langle I_{o1} \rangle$ 为参考光、物光光强之比; $\gamma_{r1} = \sigma_{r1} / \langle I_{r1} \rangle$ 为参考光光强均方根与参考光光强之比; $\gamma_e = (\sigma_{e1}^2 + \sigma_{e2}^2) / [(g')^2 \langle I_{o1} \rangle \langle I_{r1} \rangle]$ 。

一般情况下,电子噪声较小,可以忽略不计,即 $\gamma_e = 0$ 。则(17) 式变为

$$V_F = \frac{4(p_o p_r)^{1/2} \Gamma^2 |\gamma_{12}|}{2(1 + p_o p_r) \Gamma^2 + (1 - 2p_o |\gamma_{12}|^2 + p_o^2)/R + (1 - p_r)^2 \gamma_{r1}^2 R} \tag{18}$$

2 影响相关条纹图可见度因素及其优化方法

根据(18) 式,在时间相干性及空间相干性确定的前题下,可以通过选择参考光、物光光强比率 R 得到最佳条纹对比度。最佳参考光、物光光强比率 R_{opt} 由下式确定

$$[dV_F/dR] = 0 \tag{19}$$

将(18) 式代入(19) 式计算出 R_{opt} ,再代入(18) 式得,

$$V_{Fopt} = \frac{2(p_o p_r)^{1/2} \Gamma^2 |\gamma_{12}|}{(1 + p_o p_r) \Gamma^2 + (1 - p_r) \gamma_{r1} (1 - 2p_o |\gamma_{12}|^2 + p_o^2)^{1/2}} \tag{20}$$

从(20) 式可见,双脉冲散斑干涉相减法获得最佳相关条纹图对比度由时间相关函数 Γ , 双脉冲前后光强比率 p_o 和 p_r , 双脉冲物光振幅相关函数 γ_{12} 等因素决定。

2.1 光强波动对条纹对比度的影响

为了使问题简单化,在考虑双脉冲光强波动对条纹对比度影响时,假设物光、参考光光程差为 0,双脉冲前后激光光谱性质相同且二者完全相关。即 Γ, γ_{12} 均等于 1,则(20) 式变为

$$V_{Fopt} = \frac{2(p_o p_r)^{1/2}}{1 + p_o p_r + \gamma_{r1} (1 - p_o) (1 - p_r)} \tag{21}$$

为简单起见令 $p_r = p_o = p$ 。图 1 分别画出了 $\gamma_{r1} = 0.1$ (实线), $\gamma_{r1} = 0.01$ (虚线) 时条纹对比度随光强比率变化曲线。可见,曲线呈抛物线,当 $p = 1$ 时,获得最佳条纹对比度。由于脉冲激光输出光强不稳定,会导致 p 值在最佳值 $p = 1$ 附近波动,从而导致条纹对比度发生波动。因此在实验中提高激光脉冲输出的稳定性是获得高质量相关条纹图的先决条件之一。

2.2 振幅相关性对条纹对比度的影响

根据 2.1 的讨论,令双脉冲强度比率为 $p_r = p_o = p$,同时令时间相关函数 Γ 等于 1。根据(20) 式,双脉冲相关条纹对比度与振幅相关函数有如下关系

$$V_{Fopt} = \frac{2p |\gamma_{12}|}{1 + p^2 + \gamma_{r1} (1 - p) (1 + p^2 - 2p |\gamma_{12}|^2)^{1/2}} \tag{22}$$

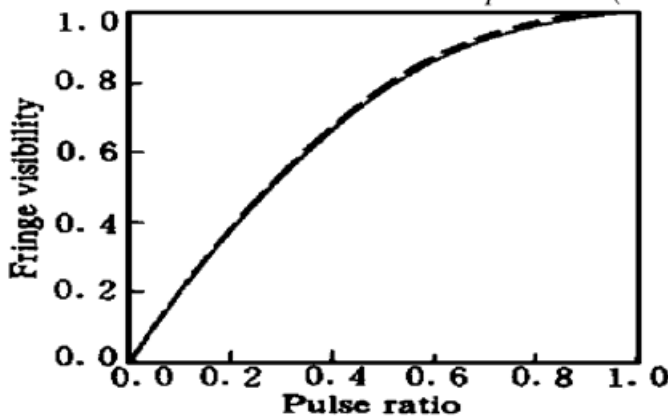


图 1 条纹对比度随双脉冲前后光强比率 (光强波动) 变化曲线

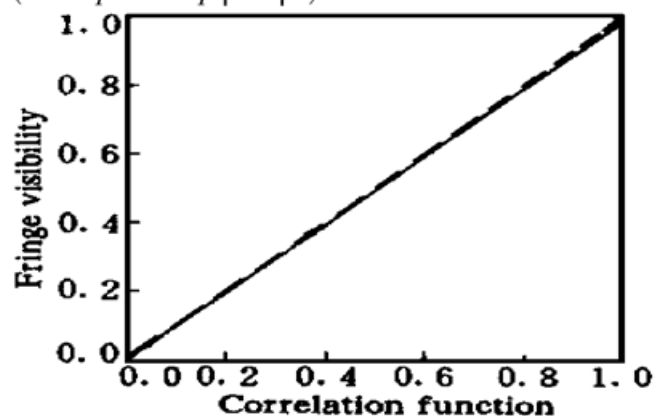


图 2 条纹对比度随物光振幅相关函数绝对值变化曲线

Fig. 1 Fringe visibility vs. intensity ratio correlation

Fig. 2 Visibility vs. amplitude

图 2 画出了 $\gamma_{r_1} = 0.1, p$ 分别等于 0.9 (实线) 和 1 (虚线) 时条纹对比度随振幅相关函数绝对值 $|\gamma_{12}|$ 的变化曲线。可见, 条纹对比度随振幅相关函数 $|\gamma_{12}|$ 增大而递增。当 p 等于 1 时, 条纹对比度等于振幅相关函数绝对值 $|\gamma_{12}|$ 。从图中可见, 无论 p 为何值, 当 $|\gamma_{12}| = 1$, 即物光散斑场完全相关时获得最佳条纹对比度。而物光完全相关的条件是二散斑场必须完全重叠, 对应用于位移和变形测试的双脉冲干涉散斑技术, 这一条件显然不成立。此时, $|\gamma_{12}| = 1$ 只是一个理论上的数值。实际上振幅相关函数 γ_{12} 由物体变形量、成像孔径光阑大小等因素决定。

图 3 为物体成像系统几何示意图。图中 \vec{K}_i, \vec{K}_o 分别为入射光波波矢和指向入瞳中心的出射光波波矢, 入瞳处坐标为 $\vec{r}_p = (x_p, y_p)$, 照明光波长为 λ 。对于脉冲双曝光前后的两个散斑场, 有^[7]

$$\langle U_{o1}^* U_{o2} \rangle = \exp[i(\vec{K}_i - \vec{K}_o) \cdot \vec{d}_o] \langle I \rangle c \quad (23)$$

其中

$$\langle I \rangle = \langle |U_{o1}|^2 \rangle = \langle |U_{o2}|^2 \rangle \quad (24)$$

$$c = \frac{1}{A} \int p(\vec{f}) p(\vec{f} - \vec{f}_i) \exp(-2\pi i \vec{f} \cdot \vec{d}_{o\perp}) d\vec{f} \quad (25)$$

(23) 式中 \vec{d}_o 表示物体上 $p(\vec{r}_o)$ 点沿空间任意方向的平动位移矢量。 $p(\vec{f})$ 为光瞳函数, $\vec{f} = \vec{r}_p / \lambda l$; $\vec{f}_i = (\vec{K}_i - \vec{K}_o)_z \times \vec{\alpha}_\perp / 2\pi$, 其中下标 z 表示离面分量, $\vec{\alpha}_\perp$ 表示物体微小转动角度矢量 $\vec{\alpha}$ 的面内分量; $\vec{d}_{o\perp}$ 为空间平移矢量 \vec{d}_o 的面内分量; c 为相关系数。 c 与振幅相关函数 $\gamma_{12}(\vec{r})$ 有如下关系

$$\gamma_{12}(\vec{r}) = \exp[i(\vec{K}_i - \vec{K}_o) \cdot \vec{d}_o] c \quad (26)$$

其中 $(\vec{K}_i - \vec{K}_o) \cdot \vec{d}_o$ 表示物体发生位移所引起的位相变化, 而空间振幅相关系数则反映两幅散斑图的复振幅相关程度。如果物体没有发生空间形变或位移, c 等于 1; 如果物体发生了大的形变或位移, 使散斑场完全退相关时, c 等于 0。通常情况下, $|c|$ 小于 1。在我们所建立的双脉冲散斑干涉系统中^[6,7], 为了满足数字空间相移横向尺寸的要求^[6], 系统中均使用了狭缝作为成像孔径光阑。而且该系统是对离面位移敏感的干涉系统, 因此可以忽略面内位移对相关条纹质量的影响, 即(25) 式中令 $\vec{d}_{o\perp} = 0$ 。根据(25) 式, 并做类似文献[3] 的处理后得到

$$c = 1 - u \quad (27)$$

$$u = \lambda f_i / D = \alpha_\perp / \alpha_{\perp \max} \quad (28)$$

其中, $\alpha_{\perp \max} = D / [\cos\theta + 1]$ 为两个散斑场恰好完全退相关时物体的转动角度; $\alpha_\perp = |\vec{\alpha}_\perp|$ 。图 4 显示了 c 随 $\alpha_\perp / \alpha_{\perp \max}$ 变化曲线。可见, 该曲线为线性递减, 说明双脉冲前后两个散斑场随着物体离面位移量的增加而减少直至二者完全退相关。

由上面的分析可知, 物体变形量、成像孔径光阑大小等因素决定了振幅相关函数 γ_{12} , 进而影响相关条纹可见度。在实验中, 可以通过控制双脉冲时间间隔来获得合适的物体变形量大小, 并选择适当的孔径光阑, 从而获得好的相关条纹图。

2.3 激光时间相干性对条纹对比度的影响

令双脉冲强度比率为 $p_r = p_o = p$, 振幅相关函数 $|\gamma_{12}| = 1$ 。根据(20) 式, 双脉冲相关条纹对比度与时间相干函数 Γ 有如下关系式

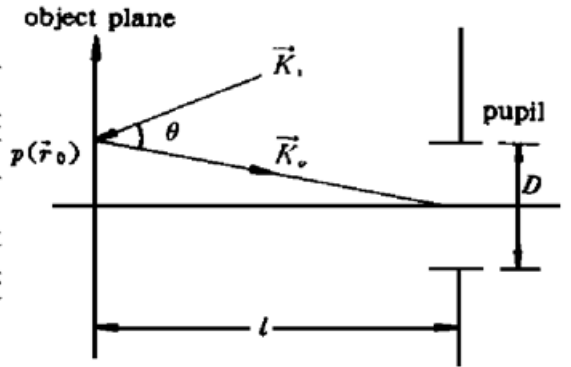


图 3 物体成像系统几何示意图

Fig. 3 Optical geometry of the imaging system

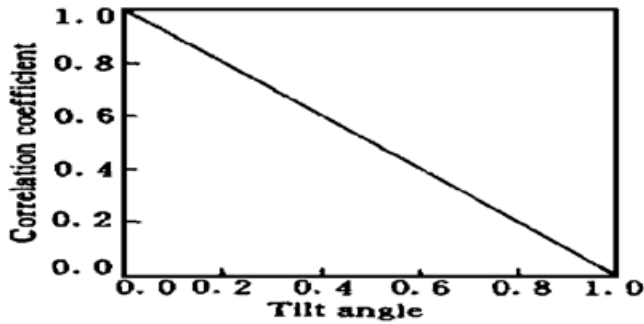


图 4 透光孔径为狭缝时 c 随 $\alpha_{\perp} / \alpha_{\perp \max}$ 的变化曲线

Fig. 4 Correlation coefficient varies with $\alpha_{\perp} / \alpha_{\perp \max}$

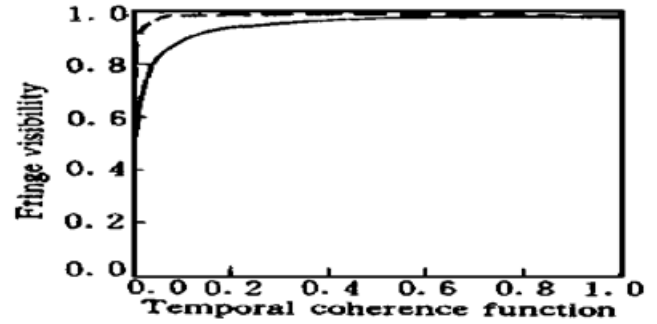


图 5 条纹对比度随 Γ 的变化曲线

Fig. 5 Visibility vs. the coherence function Γ

$$V_{Fopt} = \frac{2p\Gamma^2}{(1+p^2)\Gamma^2 + \gamma_{r1}(1-p)^2} \quad (29)$$

图 5 画出了 $p = 0.9$, $\gamma_{r1} = 0.1$ (实线) 和 $\gamma_{r1} = 0.01$ (虚线) 时条纹对比度随时间相干函数 Γ 的变化曲线。可见, 条纹对比度随时间相干函数 Γ 增大而增大。当 $\Gamma = 1$, 获得最佳条纹对比度。因此, 为了得到好的条纹对比度, 应尽可能获得大的时间相干函数值。

获取大的时间相干函数值的途径有两个: 1) 仔细调节光路, 使干涉仪两臂光程相等; 2) 压缩激光线宽。如可以通过选择激光纵模实现线宽压缩, 但是激光线宽的压缩是以牺牲激光系统输出功率为代价的。所以在实验中, 应该综合考虑, 从而选择合适的激光线宽和输出功率。

参 考 文 献

- 1 G. A. Slettemoen. General analysis of fringe contrast in electronic speckle pattern interferometry. *Optica Acta*, 1979, **26**(3): 313~ 327
- 2 H. M. Pedersen. Intensity correlation metrology: A comparative study. *Optica Acta*, 1982, **29**(1): 105~ 118
- 3 M. Owner-Petersen. Decorrelation and fringe visibility: on the limiting behavior of various electronic speckle-pattern correlation interferometers. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **8**(7): 1082~ 1089
- 4 R. Spooren. Double-pulse subtraction TV holography. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(5): 1000~ 1007
- 5 R. Spooren. Double-pulse characteristics of a single-oscillator Nd:YAG laser affecting its performance in TV holography. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(2): 208~ 216
- 6 Peng Xiang, Zhu Shaoming, Gao Zhi *et al.*. Double-pulse digital speckle pattern interferometry. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A23**(4): 847~ 851 (in Chinese)
- 7 Peng Xiang, Zhu Shaoming. The measurement of cardiac displacement using DSPI. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(9): 814~ 818 (in Chinese)

Performance Analysis of DP-DSPI: Visibility and Optimization

Zhu Shaoming Peng Xiang Zhang Zonghua Hu Xiaotang

(College of Precision Instrumentation & Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Open Laboratory of Photoelectronics and Information Engineering, National Education Committee, Tianjin 300072)

Abstract In order to obtain the high-quality speckle correlation fringe pattern from double-pulse digital speckle pattern interferometry, the factors which might affect the visibility of correlation fringes are analyzed, and the visibility optimization of correlation-fringe pattern is presented.

Key words double-pulse DSPI, system performance, visibility optimization