

CCD 对高空间分辨率波前干涉检测的影响*

徐建程 邓 燕 柴立群 许 乔 石崎凯

(成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

摘 要 推导并用实验验证了光强与入射波前在单位像元面积里成近似线性关系, 从而得到入射波前经 CCD 采样后的功率谱密度(PSD)公式. 根据该公式, 模拟分析了影响 CCD 采集系统的系统传递函数的各个因素: 入射波前、CCD 的填充因子及 CCD 的曝光时间, 得出了他们与系统传递函数的定性关系, 并且通过实验明确 CCD 曝光时间对高空间分辨率波前检测不确定度的影响, 为高空间分辨率干涉设计提供了理论依据.

关键词 干涉检测; 系统传递函数; 功率谱密度(PSD); 高空间分辨率; CCD

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

0 引言

高功率激光系统对大口径光学元件透射或反射波面质量要求在高、中、低频波段做严格的控制, 尤其不能忽略中频波段, 因为中频段误差, 会引起高功率激光束小角散射和非线性增益, 是破坏高功率激光系统的主要根源^[1]. 目前主要采用干涉仪测量的方法得到光学元件的中频信息, 它要求干涉仪口径小, CCD 分辨率高, 从而有较高的系统传递函数.

很多学者对 CCD 的调制传递函数进行了研究^[2,5], 但是在高空间分辨率波前干涉检测里, 入射量是相位信息, 所以光学调制传递函数 MTF 不适合评估干涉仪的分辨率, 应采用一个相位物体来测量系统传递函数(STF)^[6]; 另外, 入射波前以及 CCD 的填充因子和曝光时间都会影响 CCD 采集系统的系统传递函数, 这些以前研究中没有考虑到的.

本文从入射波前经采样后的功率谱密度(PSD)出发, 推导出 CCD 采集系统的 STF, 并对影响系统传递函数主要因素(入射波前, CCD 填充因子和曝光时间)进行了详细理论模拟和实验研究, 为高空间分辨率干涉仪设计和高空间分辨率波前检测提供了理论指导.

1 CCD 采集系统的系统传递函数

对于 CCD 阵列的传递函数, 必须考虑 CCD 是一种采样输出器件. CCD 阵列是由一些矩形光敏元件组成的, 假设光敏矩形大小为 $\Delta x \times \Delta y$, 光敏元件的间距分别为 X_D, Y_D , 则光强采样输出为

$$I_o(x, y) = \frac{1}{x_D y_D \Delta x \Delta y} [I_i(x, y) \otimes \text{rect}(\frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y})] \cdot \text{comb}(\frac{x}{x_D}, \frac{y}{y_D}) \quad (1)$$

式中 $I_i(x, y)$ 为输入光强.

$$\text{comb}(\frac{x}{x_D}, \frac{y}{y_D}) = x_D y_D \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - x_D \cdot m) \delta(y - y_D \cdot n) \quad (2)$$

在干涉测量系统里, CCD 上光强可以表示为

$$I = |[a \exp(jk w(x, y)) + a \exp(jk(w_0 + d))]|^2 = 2a^2 + 2a^2 \cdot \cos(k(w(x, y) - d - w_0)) \quad (3)$$

$w(x, y), w_0$ 分别表示入射波前和参考波前, k 为光波波矢, d 为入射波前和参考波前之间的距离. 干涉测量时, 被测元件是弱位相物体, 同时, 为了减少波前倾斜引入系统像差, 要求在 CCD 上干涉条纹数只有几根或零条纹. 对单位像元面积而言, Δx 非常小, 入射波前 $|k w(\Delta x, \Delta y)| \ll 2\pi$, 且参考波前 $w_0 = 0$, 所以单位像元面积上的光强(忽略高次项)

$$I_{\text{pixel}} = 2a^2 + 2a^2 \cdot \cos(k(w(\Delta x, \Delta y) - d)) = 2a^2 + 2a^2 \cdot [\cos(kw(\Delta x, \Delta y)) \cdot \cos(kd) + \sin(kw(\Delta x, \Delta y)) \cdot \sin(kd)] \approx 2a^2 + 2a^2 \cdot [\cos(kd) + kw(\Delta x, \Delta y) \cdot \sin(kd)] \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知: 在单位像元面积内, 光强是入射波前的近似线性函数, 所以可以近似认为 CCD 对入射波前和光强的作用一样, 都是将积分平均值作为该像素点的值. 根据光强采样输出, 可得波前采样输出

$$w_o(x, y) \approx \frac{1}{x_D y_D \Delta x \Delta y} [w_i(x, y) \otimes \text{rect}(\frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y})] \cdot \text{comb}(\frac{x}{x_D}, \frac{y}{y_D}) \quad (5)$$

式中 $w_i(x, y)$ 为入射波前. 则其采样后的功率谱密度 PSD^[6,7] 可以表示为

$$PSD_o = [PSD_i \sin^2(\Delta x f_x, \Delta y f_y)] \otimes \text{comb}(x_D f_x, y_D f_y) \quad (6)$$

式中 $PSD_o = [F(w_o(x, y))]^2 / L_x L_y$ 表示采样后的波前功率谱密度, $PSD_i = [F(w_i(x, y))]^2 / L_x L_y$ 表示入射波前功率谱密度, F 代表傅里叶变化, L_x, L_y 代表入射波前 x, y 方向的长度. 则 CCD 采集系统的系统传递函数可以表示为^[8]

* 中国工程物理研究院人才基金(zx0104)资助项目
Tel: 028-85136793 Email: xujiancheng8143@126.com
收稿日期: 2005-10-20

$$STF_{\text{CCD}} = \sqrt{\frac{PSD_o}{PSD_i}} \quad (7)$$

由式(6)、(7)可知: CCD采集系统的 STF 不但与 CCD的参量填充因子有关, 还与入射波前的 PSD 有关.

2 影响 CCD 采集系统 STF 的主要因素

2.1 入射波前最高空间频率对采集系 STF 的影响

假设 CCD的填充因子为 1, 入射波前 PSD 等于 $A\nu^{-b}$, $A=1.05$, $b=1.55$, 最大空间频率为 ν_{max} , 通常由成像系统光阑尺寸决定. 根据式(6)、(7)分别计算 $\nu_{\text{max}}=10 \text{ mm}^{-1}$, $\nu_{\text{max}}=6 \text{ mm}^{-1}$, $\nu_{\text{max}}=5 \text{ mm}^{-1}$ 三种情况采集系统的 STF , 如图 1. 随着入射波前最大空间频率从 5 mm^{-1} (Nyquist 频率) 增大到 10 mm^{-1} , 一方面, CCD采集系统的 STF 在各个空间频率总体呈增大趋势, 这是因为混频的原因; 另外一方面, 能可靠测量的最大空间频率逐步减小(因为一般认为高频处系统传递函数突然增长的信息为虚假信息). 所以为了得到可靠的高空间分辨率信息, 要根据 Nyquist 频率, 及需要可靠测量的分辨率, 合理设计干涉仪成像系统中的光阑尺寸.

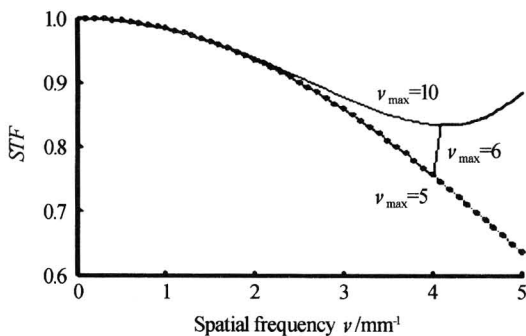


图 1 STF 和入射波前最大空间频率的关系
Fig. 1 Relation between STF and the maximal spatial frequency of input wavefront

2.2 不同参量 b 对采集系统 STF 的影响

分别取入射波前 PSD 参量 $b=1, 2, 3$, 根据式(6)、(7)分别计算采集系统的 STF , 其结果如图 2.

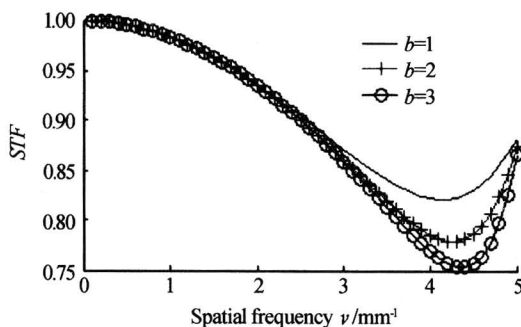


图 2 STF 和入射波前 PSD 的参量 b 的关系
Fig. 2 Relation between STF and the b of input wavefront PSD

由图可知: 随着 b 的增大(入射波前高频能量迅速减小), 混频现象变得不明显了, CCD采集系统的 STF 在各个空间频率总体都呈下降趋势, 但是能可靠测量的最大空间频率逐步接近 Nyquist 频率.

2.3 CCD 填充因子对采集系统 STF 的影响

本文中 CCD的填充因子(Fill Factor)定义为 CCD像素尺寸与像素间距之比(一维), 一般情况下, CCD的填充因子在 0.55 和 1 之间. 填充因子对 CCD采集系统的 STF 影响很大: 当入射波前最大空间频率 $\nu_{\text{max}}=5 \text{ mm}^{-1}$ 时(Nyquist 频率), CCD采集系统的系统传递函数和填充因子关系如图 3(a), 随着填充因子从 1 减小到 0.4, 采集系统 STF 总体呈上升趋势, 这说明空间积分的光敏单元面积越小, 越能保真细节部分; 当入射波前最大空间频率 $\nu_{\text{max}}=8 \text{ mm}^{-1}$ 时, 随着填充因子从 1 减小到 0.4, 采集系统 STF 总体呈上升趋势, 但是能可靠测量的空间频率逐步减小(混频的原因), 如图 3(b). 所以为同时兼顾高的系统传递函数和高的可靠测量空间频率, 填充因子取 0.8 比较合适.

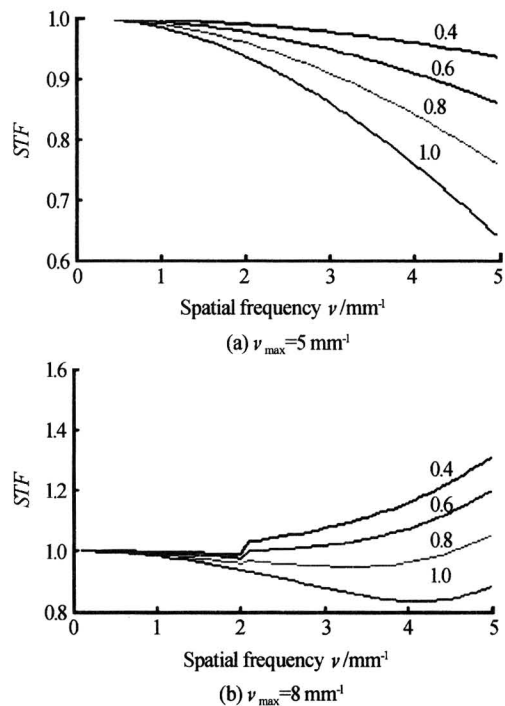


图 3 STF 和 CCD 填充因子的关系
Fig. 3 Relation between STF and the fill factor of CCD

3 实验结果

为了检测光学元件的中频信息, 建立了 $\Phi 100$ 高空间分辨率干涉仪系统, 该干涉仪采用固定放大倍率的完全相干成像系统, 采用 UNIQ 公司的 UP-1830 型号的 10 位数字 CCD, 它的实际感光面积为 $6.45 \text{ mm} \times 6.45 \text{ mm}$, 单位像元面积为 $8.30 \text{ mm} \times 8.30 \text{ mm}$, 所以它的填充因子(一维)为 0.78.

3.1 验证光强与入射波前的近似线性关系

用 1024×1024 的 CCD 采样 $\phi 100$ 干涉图(小于 2 根条纹), 计算得到的面形的一维分布作为入射波前, P-V 值为 0.16 波长, 如图 4. 在干涉图和入射波前图中任意对应位置上取 16×16 的数据作为一个像素面积, 则在单位像素面积光强和入射波前的关系如图 5(一维). 由图可知: 在单位像素面积内, 光强和入射波前是近似线性关系. 假设用 128×128 的 CCD 对入射波前直接采样, 即对 8×8 的数据进行累加平均作为中心像素的值, 其波前一维分布如图 6 中的蓝线; 若用 128×128 的 CCD 对入射波前与参考波前干涉得到的干涉条纹进行采样, 得到 13 幅相移量为 $\pi/4$ 的干涉图, 然后通过 13 步相移算法得到采样光强后的波前, 其一维分布如图 6 中的红点划线. 由图 6 可知: 红点划线和蓝线接近完全重

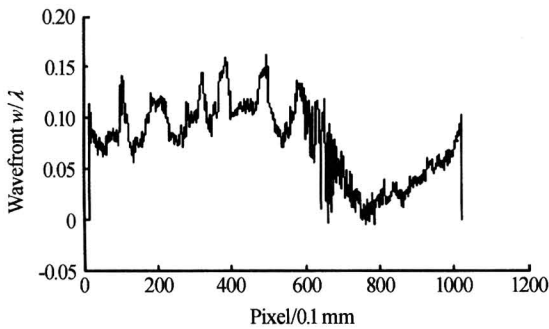


图 4 入射波前
Fig. 4 Input wavefront

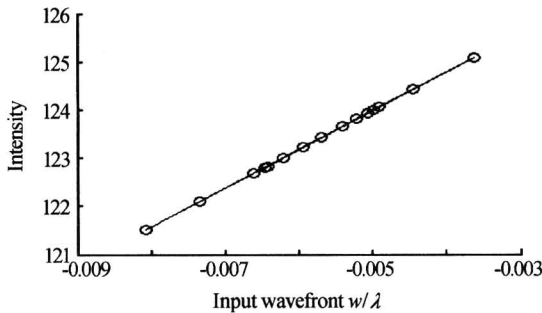


图 5 单位像素面积内光强和入射波前的关系
Fig. 5 Relation between intensity and input wavefront in unit pixel

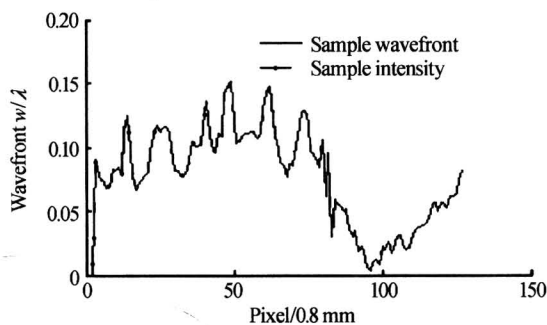


图 6 直接采样波前与采样光强后计算得到波前的比较
Fig. 6 Comparison between sampled wavefront and wavefront calculated according to sampled intensity

合, 这说明 CCD 采样光强后计算得到波前和直接采样波前得到结果近似完全相同.

3.2 曝光时间对系统传递函数的影响

采用台阶法测量 $\phi 100$ 高空间分辨率干涉仪的系统传递函数^[8], 改变其快门速度, 使其曝光时间为分别 1/500 和 1/6000 秒, 同时相应改变 CCD 的增益得到合适的亮度, 6 次测量计算得到的平均系统传递函数如图 7, 其中蓝线代表曝光时间为 1/500 的平均系统传递函数; 红线代表曝光时间为 1/6000 的平均系统传递函数; 图 8 代表平均每次测量的系统传递函数与平均系统传递函数之差的绝对值. 由图 7、8 可知: 长时间曝光的系统传递函数的在低频处的值比短时间曝光高, 而在中高频处的值比短时间曝光低; 另一方面, 曝光时间越长, 平均每次测量的系统传递函数与平均系统传递函数之差的绝对值越小, 即系统传递函数测量重复性越好.

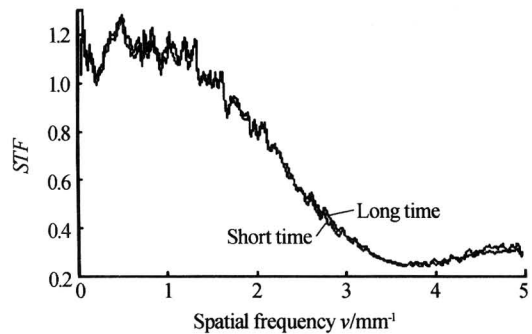


图 7 STF 和 CCD 曝光时间的关系
Fig. 7 Relation between STF and the exposure time of CCD

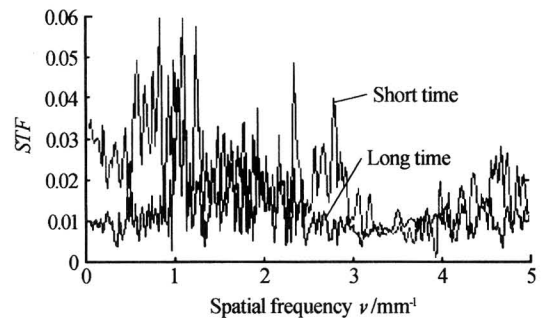


图 8 STF 测量重复性和 CCD 曝光时间的关系
Fig. 8 Relation between repeatability of STF and the exposure time of CCD

4 结论

高空间分辨率波前干涉检测系统要求系统具有高系统传递函数和高测量重复性. 对 CCD 采集系统而言, 主要跟入射波前、CCD 填充因子、CCD 曝光时间有关. 入射波前最大空间频率越大, 系统传递函数越高, 但是可能出现伪分辨, 而且测量重复性也会由于中高频噪音而降低; CCD 填充因子越低, 系统传递函数会越高, 但是当入射波前频率高于 Nyquist 频率时就可能因为混频而产生伪分辨, 而

且测量重复性由于光子噪音,暗电流噪音而降低;曝光时间越长,低频传递能力越强,高频传递能力越弱,系统传递函数测量重复性越好. 本文在模拟和实验的基础上给出了一些关于 CCD 对系统传递函数影响的定性结论,对高空间分辨率干涉仪设计和高空间分辨率波前检测起到了指导作用.

参考文献

- 1 Trenholme J B. Theory of irregularity growth on laser beams, 1975 Annual Report, UCRL-50021-75, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, 1975;237~242
- 2 杨桦,焦文春,朱永红,等. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数. 光学学报,2002,22(3):313~316
Yang H, Jiao W C, Zhu Y H, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002,22(3):313~316
- 3 江孝国,谭肇,李泽仁,等. 影响 CCD 调制传递函数因素研究. 光子学报,2003,32(7):830~833
Jiang X G, Tan Z, Li Z R, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(7):830~833
- 4 车双良,汶德胜. 亚象元动态成像系统空间分辨率研究. 光子学报,2001,30(11):1418~1420
Che S L, Wen D S. *Acta Photonica Sinica*, 2001,30(11):1418~1420
- 5 周俸才,管永红. 闪光 X 射线照相系统调制传递函数测量. 光子学报,2001,30(2):218~224
Zhou F C, Guan Y H. *Acta Photonica Sinica*, 2001,30(2):218~224
- 6 Ai C, Knowlton R, Lamb R. Design of 24 "Phase-shifting fizeau interferometer. *SPIE*, 1997,3134:447~455
- 7 Lawson J K, Aikens D M, English R E, et al. Power spectral density specifications for high-power laser systems. *SPIE*, 1996,2775:345~356
- 8 Novak E, Ai C, Wyant J C. Transfer function characterization of laser Fizeau interferometer for high spatial frequency phase measurements. *SPIE*, 1997,3134:114~121

The Effect of CCD on High Spatial Resolution Interferometric Optical Test

Xu Jiancheng Deng Yan Chai Liqun Xu Qiao, Shi Qikai

Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041

Received date:2005-10-20

Abstract It is deduced and verified by experiment that the relation between optical intensity and incidence wavefront is nearly linear in unit cell size. Therefore, the formula of PSD sampled by CCD is obtained. According to the formula, many factors affecting the system transfer function in the CCD capture system are simulated and conformed by experiment, such as the maximum spatial frequency of incidence wavefront, the PSD of incidence wavefront in high spatial frequency, the fill factor and the exposure time of CCD. Then some useful qualitative conclusions between these factors and the system transfer function are obtained. Furthermore, the qualitative relation between the exposure time of CCD and repeatability of high spatial resolution interferometric optical test is conformed by experiment.

Keywords Interferometry; High spatial frequency; Power spectral density (PSD); System transfer function (STF); CCD



Xu Jiancheng was born in Zhejiang province in 1981, graduated from photoelectron technology specialty of Department of electronics and information of Sichuan University in 2003, now he is studying for M. S. degree in Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, China Academy of Engineering Physics. His research interests include optical measurement techniques and optical system design. He is working on high spatial frequency interferometric optical test.