

测量 CCD 传递函数的实验系统*

宋 敏 胡家升 李叶芳 孙 怡

(大连理工大学电子与信息工程学院 大连 116023)

提要 介绍了一种新型的测量 CCD 传递函数的灵巧系统,该系统包括能产生动态变频正弦光栅图样的灵巧干涉仪系统,数据采集和转换系统,数字处理所必须的软硬件等。测量结果表明:干涉仪所产生的正弦光栅图样,可在 0.2~80 line pair/mm 的空间频率范围内以误差小于 1% 的精度实现连续变频,且信号的调制对比度接近于 1。将该干涉仪产生的正弦光栅图样用作测量 CCD 的调制传递函数的靶标,再采用我们专门研制的数据处理软硬件,得到了令人满意的测量结果。

关键词 CCD, 正弦光栅, 干涉仪

1 引 言

长期以来,调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)一直是评价成像系统质量的重要指标,因为它能够真实地反映成像系统的空间频率响应特性。电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)虽然是一种离散的成像器件,但是由于把 MTF 作为评价其成像质量指标可能遇到的理论问题已经解决^[1]。因此,如何用 MTF 来评价 CCD 的成像质量就成为近期的研究热点。迄今为止,人们已经提出了诸如刃边法、激光散斑法、扩展频率孔径法等几种测量 CCD 的 MTF 的方法^[2~5]。由这些方法可以看出,测量 MTF 的关键是靶标函数的选择。因为靶标函数的选择决定了整个测量装置的测量精度和操作的复杂程度。比如,用刃边或图形板做靶标函数时,通常需要高质量的光学成像系统将靶标引入到 CCD 像面上,有的还要采用高精度的扫描系统(如刃边法)。当采用随机图样做靶标函数时,高噪声、制作理想衍射孔径的复杂工艺以及繁杂的数据处理,也使它的应用受到限制。理论和实验研究表明:在测 MTF 时,正弦函数是最理想的靶标函数,因为它经过成像系统成像后,仍为同频率的正弦函数,只是幅值和位相会发生变化。因此,采用正弦图样作为靶标函数可以简化数据处理^[6]。K. J. Barnard 等曾用变频的扬氏干涉获得正弦信号来测量 SPRITE 探测器的 MTF^[7],但频率变化范围很小。我们设计并装备了一套灵巧干涉仪系统,它具有体积小、变频方法简单且变频范围大、所产生的正弦光栅图样的调制对比度高等特点。当该系统用于 CCD 的 MTF 检测时,可将产生的正弦光栅图样做靶函数直接照射 CCD 像面,这不仅省去了将靶标引入 CCD 时所需的光学成像系统,而且还消除它对 MTF 测量的影响,使数据处理得到简化。从而使检测 CCD 的 MTF 的精度和速度有了显著的提高。

* 国家自然科学基金资助项目。

2 测量原理

我们来考察一下两个单色平面波相干时,其光强的分布情况。下面的两束平面光波 \vec{E}_1, \vec{E}_2

$$\begin{aligned}\vec{E}_{1(r,t)} &= \vec{A}_1 \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \epsilon_1 - \omega t) \\ \vec{E}_{2(r,t)} &= \vec{A}_2 \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \epsilon_2 - \omega t)\end{aligned}$$

在空间某点 P 处相干时,其光强分布为

$$I = \frac{1}{2}A_1^2 + \frac{1}{2}A_2^2 + A_1A_2 \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \epsilon_1 - \epsilon_2) = I_1 + I_2 + 2(I_1I_2)^{1/2} \cos\delta \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned}I_1 &= \langle \vec{E}_1^2 \rangle = \frac{1}{2}A_1^2 \\ I_2 &= \langle \vec{E}_2^2 \rangle = \frac{1}{2}A_2^2 \\ \delta &= \vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \epsilon_1 - \epsilon_2\end{aligned} \quad (2)$$

式中 A_1, A_2 为振幅, \vec{k}_1, \vec{k}_2 为波矢, \vec{r} 为位置矢量, ϵ_1, ϵ_2 为初始位相。公式(1)中的前两项为常数,由此可知,当两束单色平面光波相干时,所形成的干涉条纹是光强呈正弦分布的线状图样。

再来考察一下来自同一激光器的两束平行光相干时,所产生的条纹场的空间分布情况。设两列同频率的单色平面波同时到达 $z = 0$ 的波前上,它们的振幅分别为 A_1, A_2 , 在坐标原点处的初位相分别为 ϵ_1, ϵ_2 , 传播的方向角分别为 $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 和 $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ ^[8], 如图 1 所示, 于是波前的位相分布

$$\begin{aligned}\varphi_{(x,y)} &= k(\cos\alpha_1 x + \cos\beta_1 y) - \epsilon_1 \\ \varphi_{(x,y)} &= k(\cos\alpha_2 x + \cos\beta_2 y) - \epsilon_2\end{aligned}$$

则位相差为

$$\delta_{(x,y)} = k(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)x + k(\cos\beta_1 - \cos\beta_2)y - \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (3)$$

因此,所产生的干涉条纹不但呈线状分布,而且其方向取决于 $(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$ 与 $(\cos\beta_1 - \cos\beta_2)$ 的值,如图 2 所示。沿 x, y 两方向条纹的峰-峰或谷-谷间距分别为

$$X = \frac{2\pi}{k(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)} = \frac{\lambda}{\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2} \quad (4)$$

$$Y = \frac{2\pi}{k(\cos\beta_1 - \cos\beta_2)} = \frac{\lambda}{\cos\beta_1 - \cos\beta_2} \quad (5)$$

若两束平行光传播方向与 $x-z$ 面平行,与 z 轴交角分别为 $0, \theta$, 则

$$f_x = \frac{\sin\theta}{\lambda} \quad f_y = 0 \quad (6)$$

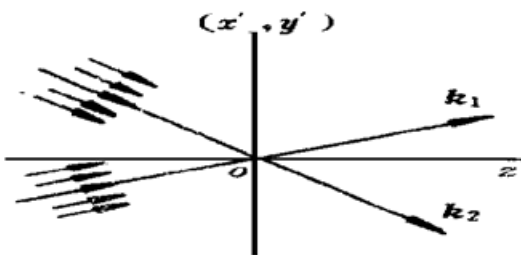


图 1 两个平面波的波前

Fig. 1 The wavefronts of two plane waves

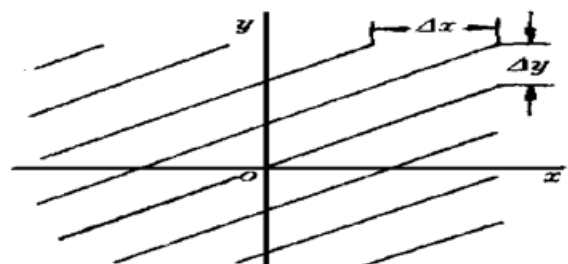


图 2 干涉图样

Fig. 2 Interference pattern

亦即干涉条纹的方向垂直于两束光所构成的平面, 条纹的空间频率由两束光的夹角和波长所决定。在波长一定的情况下, 连续改变两束光的夹角即可达到连续改变空间频率的目的。

3 灵巧干涉仪的实现

在用 Mach-Zehnder 干涉法和劳埃镜法等光路进行多次尝试性实验后, 确定了如图 3 所示的光路。用一个小 He-Ne 激光器作光源, 从激光器发出的光经空间滤波和扩束后, 变成一束直径为 $\phi 60\text{ mm}$ 的平行光, 该平行光的上半部分照到固定于机械转台上的反射镜 M 上, 经反射镜 M 反射后进入分束的立方棱镜 CBS。平行光的下半部分直接进入分束的立方棱镜, 在上、下半部分平行光从立方棱镜出来后, 将会分别在出射方向 1 和 2 两个位置处相遇, 并形成干涉场, 获得正弦光栅图样。改变反射镜 M 的夹角, 即可实现连续改变正弦光栅图样的空间频率的目的。整个干涉仪的所有元件均固定于一个底座上, 其外形尺寸可控制在 $400\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 范围内。采用带有半反半透膜的立方棱镜来代替半反半透镜的好处是: (1) 消除了半反半透镜难以避免的双像, 提高了条纹的对比度; (2) 结构紧凑, 装配调整方便; (3) 抗震动, 抗外界干扰能力强。但由于对立方棱镜的精度要求高, 给光学加工带来一定的困难。

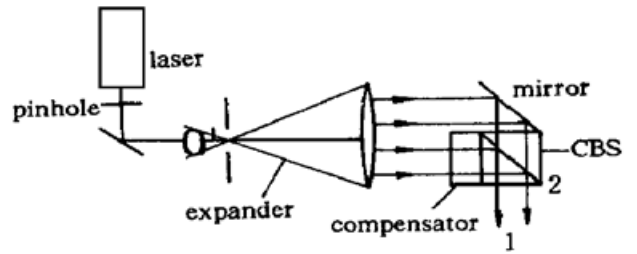


图 3 灵巧干涉仪

Fig. 3 Scheme of miniature interferometer

为了获得高调制对比度的正弦光栅图样, 立方棱镜的分束比选为 $1:1$, 并在立方棱镜前面加一块补偿板, 以保证两束相干光在相干处光强度和光程尽量相等。由于在位置 2 处的光栅图样有直射光的影响, 降低了信噪比, 因此选择位置 1 处的干涉场。采用激光器作光源, 散斑噪声无法避免, 如果采用通常的消除散斑噪声的方法, 势必损失干涉条纹的对比度, 因此我们采用时间平均法来消除散斑噪声的影响。图 4 (a) 和 (b) 分别给出了没有经过平均和经过 3 次平均的结果。

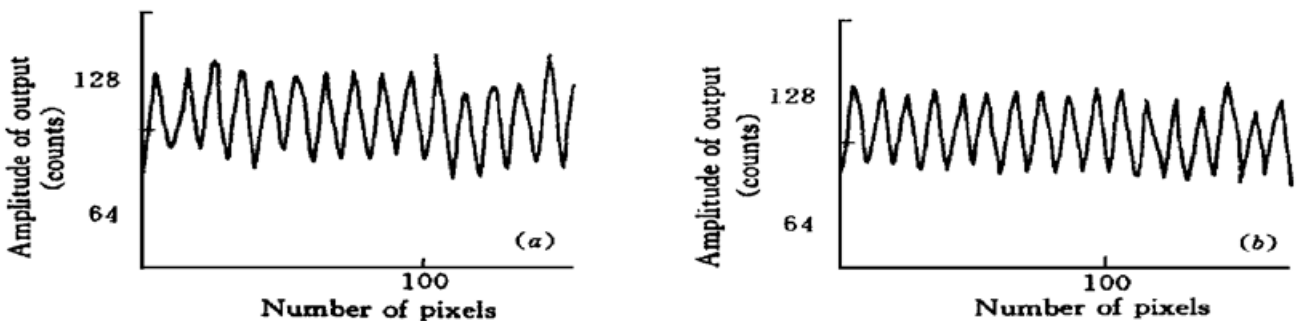


图 4

(a) 单次采样; (b) 3 次平均

Fig. 4

(a) single-sample result; (b) the result by averaging over three times

4 测试结果

对所装备的干涉仪的有关参数进行测试。

4.1 变频精度的测定

用标准 CCD 测出了光栅图样空间频率随反射镜 M 角度变化的情况。表 1 列出了部分测量结果及利用公式 $f = \sin\theta/\lambda$ 计算的结果。

表 1 部分测量和实验结果

Table 1 Part of measured and calculated results. units: line pair/mm

Position/mm	Measured results	Calculation results	Deviation
0.02	1.05	1.21	0.16
0.10	5.27	5.16	0.09
0.20	10.53	10.58	0.05
0.30	15.80	15.83	0.03
0.38	20.02	20.00	0.02
0.48	25.28	25.02	0.26
0.58	30.55	30.16	0.39
0.68	35.81	35.58	0.23
0.76	40.02	39.93	0.09

4.2 光栅图样调制对比度测定

分别用标准 CCD 和全息干版记录了获得的光栅图样, 图 5 是用线阵和面阵 CCD 记录的空间频率为 4 line pair/mm 和 2 line pair/mm 的光栅图样。

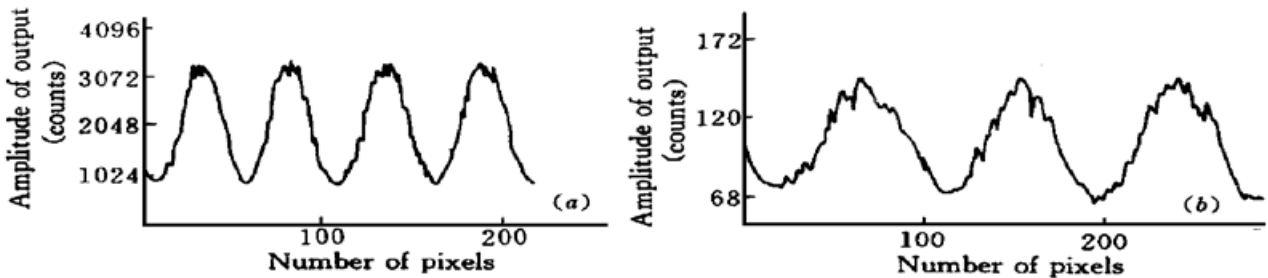


图 5 CCD 采集的正弦光栅图样

(a) 线阵 CCD; (b) 面阵 CCD

Fig. 5 Grating patterns recorded by CCD array

(a) linear CCD array; (b) area CCD array

表 2 实验条件和测量结果

Table 2 Experimental conditions and measured results

Experimental conditions	Exposure time: 1 min Developing time: 2.5 min Developing temperature: 20°C				
Spatial frequency/lp/mm	1	10	20	30	40
Contrast	0.98	0.96	0.97	0.95	0.95

用 9W-型测微光度计测量了用天津-型全息干版记录的干涉图样的对比度, 实验条件及测量结果如表 2 所示。由于天津-型全息干版的截止频率 3000 line pair/mm 以上, 可以忽

略它的影响, 由表 2 可以看出, 用我们研制的灵巧干涉仪所获得的干涉图样的对比度接近于 1, 可以用作标准靶标。该干涉仪系统的最大特点是高精度、高质量、体积小、重量轻、可便携、稳定可靠, 抗干扰能力强, 不但可作为光栅图样的标准靶标, 而且还具有普通干涉仪的所有功能, 应用各个领域。

我们用该干涉系统所产生的正弦光栅图样作靶标函数, 测量了几种 CCD 的 MTF, 得到了比较满意的结果, 图 6 是 TCD1206UD 线阵 CCD 的 MTF 曲线。

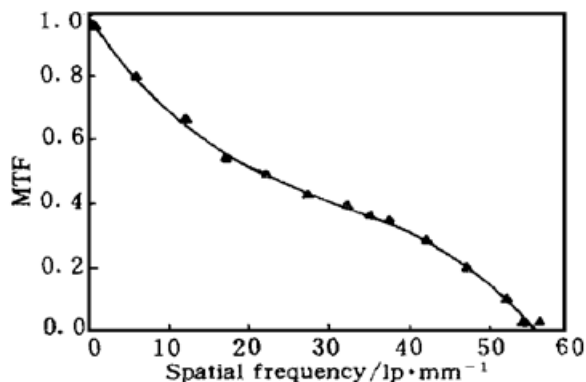


图 6 TCD1206UD 线阵 CCD 的 MTF

Fig. 6 MTF of TCD1206UD linear CCD array

参 考 文 献

- 1 W. Wittenstein, J. C. Fontanella, A. R. Newbery *et al.*. The definition of the OTF and the measurement of aliasing for sampled imaging systems. *Optica Acta*, 1982, **29**(1): 41~ 50
- 2 S. B. Campana. Techniques for evaluating charge coupled imagers. *Opt. Eng.*, 1977, **16**(3): 267~ 274
- 3 S. E. Reichenbach, S. K. Park, R. Naravanswamy. Characterizing digital image acquisition devices. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(2): 170~ 177
- 4 A. D. Ducharme, G. D. Boreman. Holographic elements for modulation transfer function testing of detector arrays. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(8): 2455~ 2458
- 5 W. Astar. New power-efficient optical filter for detector array modulation transfer function measurement by laser speckle. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(9): 2761~ 2764
- 6 J. W. Coltman. The specification of imaging properties by response to a sine wave input. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(6): 468~ 471
- 7 K. J. Barnard, G. D. Boreman, A. E. Plogstedt *et al.*. Modulation-transfer function measurement of SPRITE detectors: sine-wave response. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(1): 144~ 147
- 8 Zhong Xihua, Zhao Kaihua. Optics. Beijing: Beijing University Press, 1983. 177~ 178 (in Chinese)

Experimental System for Measuring Modulation Transfer Function of CCD

Song Min Hu Jiasheng Li Yefang Sun Yi

(College of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Abstract This paper presents a novel miniature system for measuring modulation transfer function (MTF) of CCD. This system consists of a miniature interferometer which can generate frequencies-variable sine grating patterns, data collection and transfer subsystem, software and hardware for data processing. The measured results show that the spatial frequencies of grating patterns generated by the interferometer can be continuously changed ranging from 0.2 to 80 line pair/mm with an error lower than 1%. The modulation contrast of patterns is close to one. We have used the sine grating patterns generated by the interferometer as targets to measure the MTF of CCD array. The results are satisfactory.

Key words CCD, sine grating pattern, interferometer