

矩形波板法测量光锥与 CCD 耦合器件 的 光 学 传 递 函 数 *

王耀祥 田维坚 汪丽 黄琨

(中国科学院西安光学精密机械研究所光纤与集成光学研究室, 西安 710068)

摘 要 本文采用直接对矩形波板成像的办法, 测得系统的对比传递函数, 然后再利用系统对比传递函数与系统的调制传递函数的关系, 得到系统的调制传递函数. 该方法克服了传统刀口扫描法的缺陷, 消除了由于离散型光学元件的离散性产生的空间非平移不变性的影响, 减小了测量误差, 提高了精确度.

关键词 调制传递函数; 对比传递函数; 耦合器件; 矩形波板

中图分类号 TN25 **文献标识码** A

0 引言

ICCD(Intensifier Charge Coupled Device) 图像传感器已经广泛应用于微光夜视、目标识别及探测、激光制导、机器人视角以及 X 射线高分辨率医学成像等领域^[1,2]. 利用光锥的集光及无畸变传输的特性, 将它作为光学中继元件, 将微光管光纤面板荧光屏(有效的直径通常为 18 mm, 25 mm, 30 mm) 输出的增强的图像, 耦合到 CCD 的光敏面上(对角线的尺寸通常为 12.7 mm, 16.9 mm), 从而实现微光摄影和高分辨率的成像, 是研制 ICCD 的关键技术. 光锥与 CCD 耦合器件的像质好坏将影响到整体系统的成像性能, 因此对其像质进行客观评价显得尤为重要.

光学传递函数 OTF 作为一种全面而客观的像质评价方法, 已经广泛应用于光学成像系统的像质评价中. 对于离散成像元件来说, 测量光学传递函数的方法有很多种, 其中以扫描法应用最广. 传统方法中采用刀口扫描, 由于其离散性, 需保证刀口与离散元件的单行阵列之间严格平行, 通过扫描以得到不同位置处的值, 将数据经 A/D 变换输入计算机, 由计算机进行包括傅里叶变换在内的一系列数学运算, 得到光学传递函数. 但是这种方法需保证阵列与刀口的严格平行, 并在扫描中存在着测量误差. 针对上述方法的缺陷, 本文采用直接对矩形波板成像的办法, 测得系统的对比传递函数, 然后再利用系统对比传递函数与系统的调制传递函数的关系, 得到系统的调制传递函数. 这样不仅消除了刀口扫描法测试时由于器件离散性产生的空间非平

不变性的影响^[3,4], 而且操作简单、误差较小.

1 实验测试原理

根据光学传递函数的定义可知, 系统的对比传递函数 CTF 是对方波信号的响应, 系统的调制传递函数 MTF 实际是对正弦信号的响应. 测定成像系统或元件的调制传递函数时, 本应以正弦波光栅作为成像物体, 测定正弦波光栅成像前后的调制变化. 但是正弦波光栅的分划板难于制造, 且达不到精度要求. 因此通常用矩形光栅或者矩形波板作为成像物.

设一空间频率为 ν 的矩形波板如图 1, 将它作

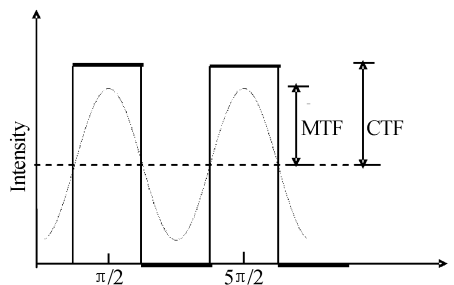


图 1 矩形波板与正弦光栅强度的关系

Fig. 1 The relation between a square-wave and sinusoidal amplitudes

傅里叶级数展开可得

$$I(x) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} (\sin 2\pi\nu x + \frac{1}{3} \sin 2\pi 3\nu x + \frac{1}{5} \sin 2\pi 5\nu x + \dots) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum \frac{1}{n} \sin(\pi n \nu x) \quad (n=1, 2, 3 \dots) \quad (1)$$

成像时, 设成像系统或元件的调制传递函数为 $MTF(\nu_i)$, 由式(1)可得矩形波板的像的亮度分布

$$I'(x) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} [MTF(\nu) \sin 2\pi\nu x + \frac{1}{3} MTF(3\nu) \sin 2\pi 3\nu x + \frac{1}{5} MTF(5\nu) \sin 2\pi 5\nu x + \dots] \quad (2)$$

* 国家 863 计划资助项目

Tel: 029-88472090 Email: materials@opt.ac.cn

收稿日期: 2004-03-29

由图 1 可知,在 $2\pi vx = \pi/2$ 处,像有最大的亮度分布值

$$I'(x)_{\max} = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} [\text{MTF}(v) - \frac{1}{3}\text{MTF}(3v) + \frac{1}{5}\text{MTF}(5v) - \dots] \quad (3)$$

在 $2\pi vx = 3\pi/2$ 处,像有最小的亮度分布值

$$I'(x)_{\min} = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} [\text{MTF}(v) - \frac{1}{3}\text{MTF}(3v) + \frac{1}{5}\text{MTF}(5v) - \dots] \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知,像的调制度为

$$M_{\text{像}} = \frac{|I_{\max} - I_{\min}|}{|I_{\max} + I_{\min}|} = \frac{4}{\pi} [\text{MTF}(v) - \frac{1}{3}\text{MTF}(3v) + \frac{1}{5}\text{MTF}(5v) - \dots] \quad (5)$$

系统对方波信号的响应是对比传递函数 CTF,因此系统的对比传递函数 CTF 可以定义为成像器件所成像的对比度 $M_{\text{像}}$ 和在一定空间频率下物体的对比度 $M_{\text{物}}$ 两者之比

$$\text{CTF} = \frac{M_{\text{像}}}{M_{\text{物}}} \quad (6)$$

对于矩形波板, $M_{\text{物}} = 1$. 将式(5)和 $M_{\text{物}}$ 代入式(6)就得到了由系统正弦波调制传递函数求矩形波对比传递函数 CTF 的关系式.

$$\text{CTF}(v) = \frac{4}{\pi} [\text{MTF}(v) - \frac{1}{3}\text{MTF}(3v) + \frac{1}{5}\text{MTF}(5v) - \dots] \quad (7)$$

利用递推法,可求得

$$\frac{1}{3}\text{CTF}(3v) = \frac{1}{3} \frac{4}{\pi} [\text{MTF}(3v) - \frac{1}{3}\text{MTF}(9v) + \frac{1}{5}\text{MTF}(15v) - \dots] \quad (8)$$

$$\frac{1}{5}\text{CTF}(5v) = \frac{1}{5} \frac{4}{\pi} [\text{MTF}(5v) - \frac{1}{3}\text{MTF}(15v) + \frac{1}{5}\text{MTF}(25v) - \dots] \quad (9)$$

依此类推,可得

$$\frac{1}{(2n+1)}\text{CTF}[(2n+1)v] = \frac{1}{(2n+1)} \frac{4}{\pi} \cdot [\text{MTF}[(2n+1)v] - \frac{1}{3}\text{MTF}[(2n+1)3v] + \dots] \quad (10)$$

式(7)加上式(8),减去式(9), \dots ,就得到了

$$\text{MTF}(v) = \frac{\pi}{4} [\text{CTF}(v) + \frac{1}{3}\text{CTF}(3v) - \frac{1}{5}\text{CTF}(5v) + \text{irregular-terms}] \quad (11)$$

后面的不规则项为

$$\frac{1}{7}\text{CTF}(7v) + \frac{1}{11}\text{CTF}(11v) - \frac{1}{13}\text{CTF}(13v) -$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{15}\text{CTF}(15v) - \frac{1}{17}\text{CTF}(17v) + \frac{1}{19}\text{CTF}(19v) + \\ & \frac{1}{21}\text{CTF}(21v) + \frac{1}{23}\text{CTF}(23v) - \dots + \\ & B_n \frac{1}{n}\text{CTF}(nv) + \dots \end{aligned} \quad (12)$$

式中, n 为奇数,且

$$B_n = \begin{cases} (-1)^m (-1)^{(n-1)/2} & \text{当 } r=m \text{ 时,} \\ 0 & \text{当 } r < m \text{ 时.} \end{cases}$$

式中的 m 是 n 分解为质数因数是质数总数.

理论上,式(11)的项数非常多,但是成像系统或元件都存在截止频率 v_{cutoff} ,一般情况下,凡是大于三分之一 v_{cutoff} 的频率 v ,系统的对比传递函数 CTF(v) 均为零^[5]. 即

$$\text{MTF}(v) = \frac{\pi}{4}\text{CTF}(v) \quad v > \frac{1}{3}v_{\text{cutoff}} \quad (13)$$

在低频时,随着项数的增大, n 也增大,而 CTF(v) 减小,因此,实际计算时使用的项数也不会大,一般选取 11 组空间频率互相成 1、3、5、 \dots 、21 比例的矩形波板测得 CTF. 最后将测得的值代入式(11),就得到了系统的 MTF.

2 实验及结果

实验中所用光锥及 CCD 的具体参数为:

光锥: 锥度比 2:1,

小端单丝直径为 4 μm ,大端单丝直径为 8 μm .

CCD 相机: 采用台湾 MINTRON 公司产的 1/3 英寸 B/W CCD 相机.

CCD 靶面尺寸: 4.8 mm(H) \times 3.6(V),

CCD 像元数: 542(H) \times 492(V)

透镜组参数: $f = 3.6$ mm, 相对孔径 $D/f = 1/1.1$, 透镜的光学调制传递函数测试值见表 1.

表 1 透镜组的光学调制传递函数测试值

空间频率 (lp/mm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45
MTF	0.988	0.967	0.946	0.925	0.904	0.884	0.864	0.844	0.824

实验装置示意图如图 2. 我们用一组不同空间频率的矩形波板为目标,利用透镜将矩形波板成像在光锥的输入端(大端),通过光锥传像到面阵 CCD 上,经由 CCD 相机用计算机图像采集卡采集到矩形波板的图像(空间频率为 15 lp/mm 的矩形波板图像见图 3),然后用计算机程序处理得到黑白条纹的灰度值(图 4),相应求出灰度最大值平均值与最小值平均值,代入式(6)可得对应于一定空间频率的 CTF 值. 分别按上述步骤进行处理,进而获得整个系统(包括透镜和耦合组件)在相应空间频率的对比传递函数 CTF,最后利用式(11)得到系统的 MTF.

根据光学传递函数的理论,系统的调制传递函数等于各部分调制传递函数的乘积,即

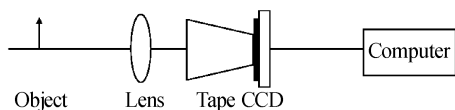


图 2 耦合器件调制传递函数测试实验装置图

Fig. 2 The structure schematic of experimental equipment

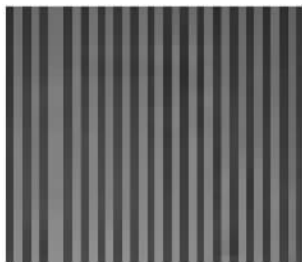


图 3 空间频率为 15 lp/mm 的矩形波板的图像

Fig. 3 The image of a square wave with spatial frequency 15 lp/mm

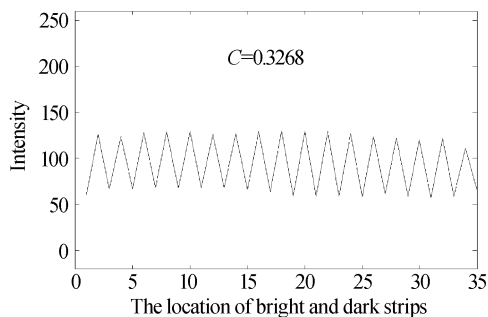


图 4 图像对应的灰度值

Fig. 4 The magnitude gray-scale of the image

$$MTF = MTF_{\text{透镜}} MTF_{\text{耦合器件}} \quad (14)$$

系统中的透镜组部分的 $MTF_{\text{透镜}}$ 可以直接测出,那么耦合器件的调制传递函数 $MTF_{\text{耦合器件}}$ 就可以相应求出。

最终得到的耦合器件对比传递函数和调制传递函数曲线见图 5。

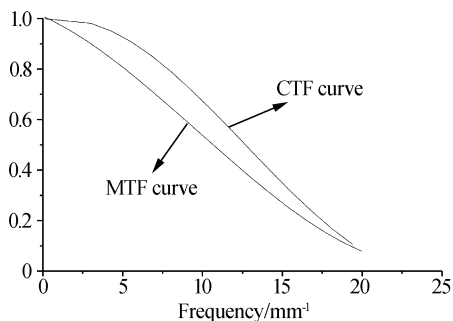


图 5 光锥与 CCD 耦合器件的对比传递函数曲线和调制传递函数曲线

Fig. 5 The CTF and MTF curves of CCD devices coupled with fiber optical taper

3 分析与讨论

采用直接对矩形波板成像的办法,来评价耦合器件的成像质量时,为了得到耦合器件的 MTF 曲线,就必须对每一个空间频率对应的 MTF 计算。

由式(11)可以看出,要通过计算得到对应一定空间频率 ν 的 MTF(ν) 值,必须测得对应一系列空间频率 $\nu, 3\nu, 5\nu, \dots, 11\nu, \dots$ 的 CTF 值。但是在实际测试过程中,由于在高频的 CTF 值较小,经常被忽略,测得的 CTF 值是有限的,因此最终由式(11)计算出来的 MTF 值要小于耦合器件实际的 MTF 值。为了提高这种方法测试的精度,得到较高精度的耦合器件的 MTF 值,应该尽可能的测得足够多频率对应的 CTF 值,然后通过内插法得到计算 MTF 值是所需要的任一点的 CTF 值^[6],最终可以得到高精度的耦合器件 MTF 测试曲线。

光锥与 CCD 都属于离散型光学元件,光锥与 CCD 耦合器件同样也存在离散型。因此,通常利用刀口法及扫描狭缝法测试耦合器件的 MTF 时^[7,8],由于受到空间非平移不变性的影响,耦合器件的 MTF 随刀口或者狭缝与耦合器件的相对位置的变化而变化,难以对耦合器件的 MTF 作出准确的评价。而采用直接对矩形波板成像的办法,测得系统的对比传递函数,然后再利用系统对比传递函数与系统的调制传递函数的关系,得到系统的调制传递函数。这种方法消除了刀口扫描法测试时由于器件离散性产生的空间非平移不变性的影响,因而得出的光锥与 CCD 耦合器件的 MTF 值更切合实际,测试的精度也较高。

4 结论

1) 系统的对比传递函数 CTF 是对方波信号的响应,系统的调制传递函数 MTF 实际是对正弦信号的响应。系统的调制传递函数 MTF 要比对比传递函数 CTF 值低。

2) 采用直接对矩形波板成像的办法,测得系统的对比传递函数,然后再利用系统对比传递函数与系统的调制传递函数的关系,得到系统的调制传递函数。这种方法消除了刀口扫描法测试时由于器件离散性产生的空间非平移不变性的影响,因而得出的光锥与 CCD 耦合器件的 MTF 值更切合实际。

参考文献

- 1 辛福学. ICCD 的光纤耦合技术. 红外与激光工程, 2000, 30(3): 210~213
Xin F X. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 30(3): 210~213
- 2 King N S P, Albright K, Jaramillo S A, et al. High frame rate CCD cameras with fast optics shutters for military and medical imaging application. *Proc of SPIE*, 1994, 2273: 56~60
- 3 Wong Hon-sun. Effect of knife-edge skew on modulation transfer function measurements of charge coupled device

- imagers employing a scanning knife-edge. *Opt Eng*, 1991, **30**(9):1394~1398
- 4 Wittenstein W, Fontenella J C, Newbery A R, *et al*. The definition of the OTF and the measurement of aliasing for sampled imaging systems. *Opt Acta*, 1982, **29**(1):41~50
- 5 麦伟麟. 光学传递函数及其数理基础. 北京: 国防工业出版社, 1979. 363~363
- Mai W L. Optical Transfer Function and Mathematical Basis. Beijing: Defense Industry Press, 1979. 363~364
- 6 Boreman G D. Modulation Transfer Function in optical and electro-optical systems. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 2001. 79~83
- 7 汪丽, 田维坚, 王耀祥, 等. 光锥与 CCD 耦合器件光学传递函数的测量. 2004 年中国光学学会, 瞬态光学和空间光学技术专题(光盘版), 2004, (4):60~63
- Wang L, Tian W J, Wang Y X, *et al*. The Chinese Optical Society, The special topic of transient Optics and Space Optics(CD edition), 2004, (4):60~63
- 8 Hadar O, Dogariu, Boreman G D. Angular dependence of sampling modulation transfer function. 1997, **36**(28):7210~7216

Measurement for Modulation Transfer Function of CCD Coupled with Fiber Optic Taper by Rectangle Bar

Wang Yaoxiang, Tian Weijian, Wang Li, Huang Kun

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date: 2004-03-29

Abstract Modulation transfer function is often used as a standard performance evaluation for optical components and imaging systems. The conventional test method for discrete optical element is the scanning knife - edge method. Because of the mosaic array architecture for taper and CCD, the integrated devices for CCD coupled with taper violate the isoplanatic conditions. The measured magnitudes of MTF vary with the position between edge and the array. In this paper, square-wave target MTF measurement was put forward. Square-wave targets with different spatial frequency were imaged by the integrated device, then transmit to the computer, the gray-scale value for the image of square-wave targets with certain spatial frequency could be got by the process program of image, so the CTF of the square-wave targets can be available, finally the MTF of the integrated device should got by the relationship between the CTF and MTF. The method avoids the influence of non-isoplanatic result from the dispersancy position between the edge and the array for measured MTF, and its precision was improved accordingly.

Keywords Optical transfer function; Contrast transfer function; Coupled device; Rectangle bar



Wang Yaoxiang was born in 1972, in Shanxi Province. He graduated from the Department of Materials Science and Engineering, Changchun College of Optics and Fine Mechanics in 1996. He received his M. S degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica in 2000, where presently he is a Ph. D. candidate. He is interested in photoelectronic material and image devices.