

光锥与 CCD 耦合器件调制传递函数的测试方法*

汪 丽^{1,2} 田维坚^{1,2} 王耀祥^{1,2} 屈有山^{1,2}

(1 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)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 采用直接对倾斜刀口成像的方法测量光锥与 CCD 耦合器件的调制传递函数。这种方法对静止刀口成像, 利用刀口与光锥纤维列间的一定倾斜角度, 在垂直于刀口的不同行之间形成不同的值, 代替了传统刀口扫描中的扫描装置, 并无需保证刀口与阵列的平行, 相应地减小了测量误差。在数据处理中采用了二次平均法, 即对同一幅图像得出的不同位置值进行平均及多次测量结果平均, 在一定程度上消除了由于离散性产生的空间非平移不变性的影响。

关键词 调制传递函数; 耦合器件; 刀口像

中图分类号 O435; O438.2

文献标识码 A

0 引言

光锥与 CCD (Charge Coupled Device) 耦合器件已经广泛应用于空间遥感探测、导弹的电视跟踪系统、微光夜视系统及医学成像等领域。利用光锥的集光及无畸变传输的特性, 可以实现图像的存储、处理、传输与显示^[1]。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, 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立叶变换在内的一系列数学运算, 得到光学传递函数^[2]。但是这种方法需保证阵列与刀口的严格平行, 这一点很难做到。并且在扫描过程中由于步长的限制存在着测量误差。针对上述方法的缺陷, 本文采用直接对倾斜刀口成像的办法, 避免使用光学系统, 这样消除了通过光学系统成像产生的图像不清晰而对结果造成产生的影响; 其次对倾斜刀口像的不同位置像的处理代替了扫描装置, 这样不仅操作简单而且减小了误差; 另外, 多次测量求平均的方法可以更大程度上消除由于离散性产生的空间非平移不变性的影响^[3-7]。

1 测试原理

根据光学传递函数理论, 对于线性空间不变光

学系统, 在非相干照明下, 系统的光学传递函数为线扩散函数 $LSF(x)$ (即线像的强度分布) 的傅里叶变换。而 $LSF(x)$ 又可以通过刀口扩展函数 $ESF(x)$ (即刀口像的强度分布) 的微分得到。分别用公式表示如下

$$OTF(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} LSF(x) \exp(-i2\pi xv) dx = MTF(u) \exp[-iPTF(u)] \quad (1)$$

$$LSF(x) = \frac{dESF(x)}{dx} \quad (2)$$

在零频到截止频率的频率域内对线扩散函数 $LSF(x)$ 进行考察, 可以得到各个空间频率的调制传递和相位传递^[8,9]。许多测试方法都是基于此原理提出的, 如刀口像分析法。对于离散探测元件来说, 不严格满足线性空间不变性。当目标物的像与离散探测元件的相对位置变化时, 像也随之变化, 从而导致所对应的 MTF (调制传递函数) 不同。因此通常取不同相对位置的平均值作为系统的 MTF。要获得目标物与离散探测元件不同相对位置的值, 在刀口像分析法中, 通常固定其中一方, 另一方进行扫描, 分别记录下每一步的像, 从而获得不同相对位置的值。

本文中所使用的方法依然根据此原理, 不再用扫描的方法获得不同相对位置的值, 而是利用刀口相对纤维列间一定的倾斜角度而形成刀口与各单丝间不同的相对位置。对于光锥与 CCD 耦合器件来说, 光锥的圆形单丝一般为六角形排列, 而 CCD 像素为矩形排列, 并且光锥耦合端的单丝直径小于面阵 CCD 的像素尺寸, 耦合后光锥的单丝与 CCD 的像素交错排列。对于特定耦合器件, 我们只能考虑光锥前端面与刀口的相对位置。刀口相对于光锥前端面的位置示意图如图 1。如图所示建立坐标系, 设光锥端面单丝的直径为 d , 刀口与纤维列间有一小倾斜角度, 设为 α , 可以看到在垂直于刀口的各个位

* 国家 863 计划基金资助项目

Tel: 029-88484669 Email: wlfuyun@opt.ac.cn

收稿日期: 2004-03-04

置处的刀口与单丝的相对位置不同. 对刀口成像后, 在垂直于刀口的方向上以 $d/\cos \alpha$ 大小的步长取样, 那么各取样点分别对应不同的相对位置, 可以得到不同的刀口响应函数, 进行一系列的数据处理后得到不同的 MTF 值, 再对这些值进行平均就获得平均 MTF 值. 图 1(b) 为图 1(a) 的局部放大图, 通过几何分析可以得出, 以步长 $d/\cos \alpha$ 的间隔取样

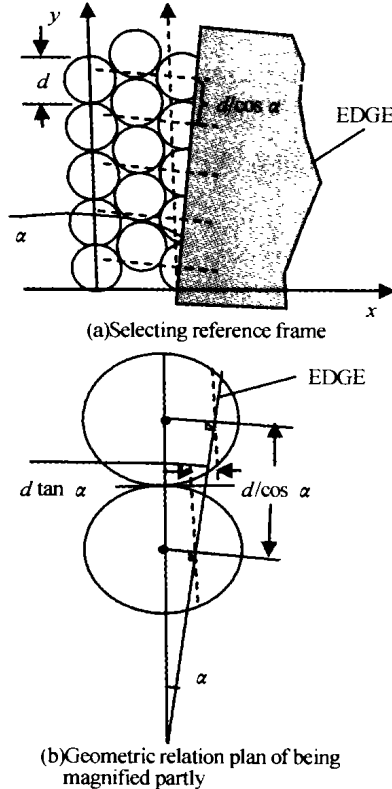


图 1 刀口与平均像元相对位置
Fig. 1 The schematic diagram of relative position of edge and average sampling array

所得到的两个相邻值相当于刀口扫描法中扫描步长为 $d \tan \alpha$ 所得到的两个值, 在 $\alpha \leq \pi/4$ 的情况下, $d/\cos \alpha > d \tan \alpha$, 也就是说这种方法克服了由于扫描精度的限制, 扫描步进难以做到足够小的缺点. 而且我们可以以相同步进取任意多的值.

2 实验及结果

实验中所用光锥及 CCD 的具体参量为: 光锥小

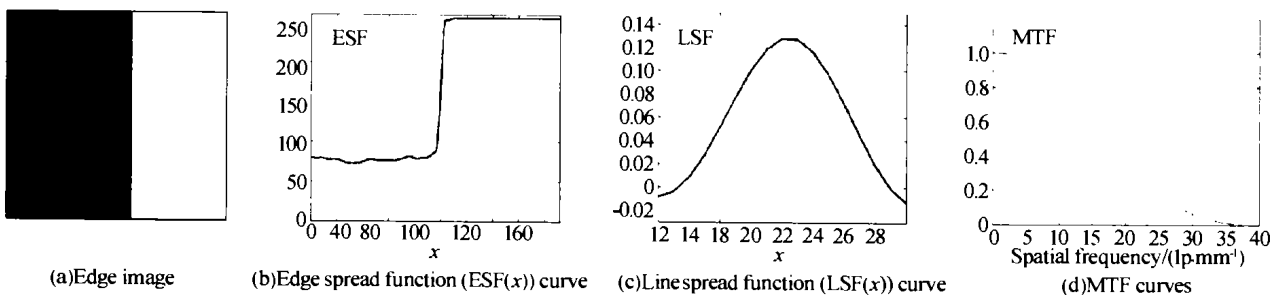


图 3 测试曲线
Fig. 3 Experimental curves

端单丝直径为 $3.09 \mu\text{m}$, 大端单丝直径为 $5.31 \mu\text{m}$; CCD 靶面尺寸为 $6.4 \text{ mm(H)} \times 4.8 \text{ mm(V)}$, 像元尺寸为 $12.5 \mu\text{m(H)} \times 9.8 \mu\text{m(V)}$.

用显微镜观测光锥的纤维列方向, 以便控制刀口放置的倾斜角度. 实验装置如图 2. 与纤维列有一定倾斜角度的刀口紧贴光锥前端面放置, 光源经积分球产生均匀光对其照明, 经光锥传像被 CCD 像元接收, 转换成 CCD 的输出电信号, 再通过相关电路, 由计算机进行信号采集并予以量化成数字灰度值. 根据图像中刀口像的位置及预先由显微镜测得的纤维列的方向可以求出刀口的倾斜角度. 选择合适的步长分别取垂直于刀口的每一行灰度值并用曲线表示, 灰度值代表了光强度值, 于是得到刀口响应函数 $ESF(x)$ 曲线. 对 $ESF(x)$ 实现微分运算, 得到线扩展函数 $LSF(x)$ 并对其进行平滑滤波及归一化运算; 用相应函数实现对 $LSF(x)$ 的傅里叶变换, 得到对应于各空间频率的 $MTF(v)$. 对同一幅刀口像的不同行数据得出的 $MTF(v)$ 值进行平均, 得到 $MTF_1(v)$. 以同样方法进行数据处理可以获得不同倾斜角度的刀口像对应的平均 $MTF(v)$. 表 1 列出了五次测试的相关参量.

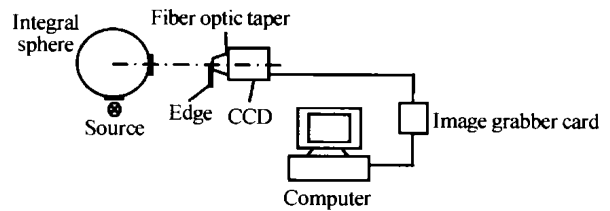


图 2 实验装置结构
Fig. 2 The structure schematic of experimental equipment

表 1 五次测量的相关参量

测试次数	倾斜角度(度)	步长(μm)	取样点数(1)
1	4	20	128
2	5	20	120
3	6	20	128
4	7	20	144
5	3	20	160

根据上表中的测试参量, 得到了如下测试结果 (以第一次测试为例): 图 3(a) 为刀口像; 图 3(b) 为图 3(a) 中某一行对应的灰度值曲线即刀口扩展函

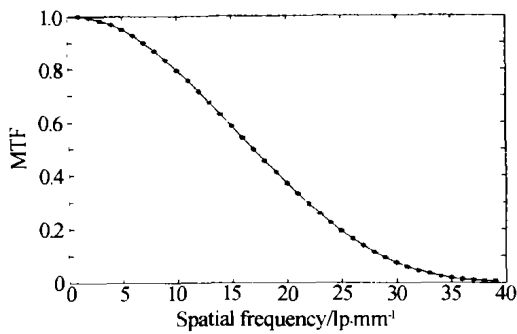


图4 MTF 平均值曲线

Fig. 4 MTF average value curve

数 $ESF(x)$ 曲线;对 $ESF(x)$ 进行微分运算得线扩散函数 $LSF(x)$ 曲线(图 3(c));取 $LSF(x)$ 傅里叶变换的模值就可以得到 MTF 曲线,图 3(d)表示的是对刀口像分别以步长为 $20\mu\text{m}$ 的间隔取值 128 次得出的 MTF 平均值. 以同样方法计算出其它倾斜角度的 MTF 平均值. 五次测试计算得出的 MTF 值再次进行平均得到最终的 MTF,如图 4. 五次测量结果基本吻合,相对误差为 0.0133.

3 结论

调制传递函数 MTF 是评价成像器件像质的重要参量,本文将其应用于评价光锥与 CCD 耦合器件的像质,提出了一种直接对倾斜刀口成像的测试方法. 这种方法具有实验装置简单的优点,数据处理中的多次平均使结果更加可靠. 但是由于耦合器件本身的限制,只考虑了刀口与光锥前端面的相对位置,至于和整个耦合器件的相对位置与 MTF 的关系,还有待进一步的实验验证. 实验结果表明,该方

法对测量耦合器件的 MTF 是行之有效的. 对以后的离散成像元件的 MTF 测试开辟了思路.

参考文献

- 1 王玲玲. 光纤光锥及其应用. 科技情报与经济, 2002, 12(6): 87 ~ 88
Wang L L. *Sci/tech Information Development and Economy*, 2002, 12(6): 87 ~ 88
- 2 杨志文. 光学测量. 北京:北京理工大学出版社, 1995
Yang Z W. *Optical Measurement*. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1995
- 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 朱克正, 赵宝升, 邹远鑫, 等. 光电成像系统动像光学传递函数. 光子学报, 2003, 32(12): 1456 ~ 1460
Zhu K Z, Zhao B S, Zou Y X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(12): 1456 ~ 1460
- 5 Williams T L. *The Optical Transfer Function of Imaging Systems*. Institute of physics publishing Bristol and Philadelphia, 1999
- 6 Wong H S. 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): 41 ~ 50
- 7 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 Sinica*, 1982, 29(1): 41 ~ 50
- 8 庄松林, 钱振邦. 光学传递函数. 北京:机械工业出版社, 1981
Zhuang S L, Qian Z B. *Optical transfer function*. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981
- 9 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
Mai W L. *Optical Transfer Function and Mathematical Basis*. Beijing: Defense Industry Press, 1979

Measurement Method for Modulation Transfer Function of Fiber Optic Taper Coupled with CCD

Wang Li^{1,2}, Tian Weijian^{1,2}, Wang Yaoxiang^{1,2}, Qu Youshan^{1,2}

1 Fiber and Integrated Optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

2 The Postgraduate Institute, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2004-03-04

Abstract A method that imaged directly to sloping edge was used to get the modulation transfer function of fiber optic taper coupled with CCD. It used static edge that was tilted slightly with respect to the columns of fibre to achieve different value of different row. This method replaced scanning in conventional test and it was not necessary to ensure that edge was parallel strictly to array. Thus mechanical error was deduced accordingly. In data processing adopting two averages including different position of one image and multi-measurement result. This processing avoided the influence of non-isoplanatic result from dispersancy to a certain extent.

Keywords Modulation transfer function; Coupled device; Edge image

Wang Li received the Bachelor's Degree in the Institute of Physical Science and Technology in 2001 from the Hebei University. Now she is a postgraduate student in Fiber and Integrated Optics Laboratory of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. Her research work focuses on optics measurement.

