

光锥的光学传递函数测试方法研究

马卫红^{1,2} 马 臻¹ 张 薇¹ 贺 丽¹ 李英才¹

(1 中科院西安光精密机械研究所空间室, 西安 710068)

(2 西安工业学院, 西安 710032)

摘 要 从传像方式上给出了光锥的理论传递函数,并提出了利用星点像分析测试其 MTF 的方法,通过具体实验给出了 MTF 的测试结果. 测试结果表明,合理的选取测试组件参数,可以得到光锥在较大频率范围内的光学传递函数(>100 lp/mm). 从 MTF 趋势上看,测试结果与理论推导呈一致性.

关键词 光学传递函数;光锥;针孔像分析

中图分类号 O348.1 **文献标识码** A

0 引言

光锥具有放大和缩小图像作用,广泛应用于 CCD 耦合、图像增强器耦合、医疗和牙科摄像拍片方面以及电视成像和先进的成像应用方面,作为系统一部分,其传像质量影响仪器的整体性能. 目前,光学传递函数已在像质评价方面占有主导地位,并已广泛地应用于光学设计过程及光学系统的检验,因为它能克服过去的一些评价标准的明显不足,从而使光学系统的设计和检验建立在更加可靠的基础上^[1,2]. 光锥作为特殊的传像器件,用传递函数来评价其成像质量被越来越多的科技工作者所接受^[3]. 目前光锥的 MTF 测试还未见相关报道,光纤面板的测试有采用刀口法^[4]和样条板测试法的,然而由于受到刀口和样条板制作工艺及扫描机构的限制,目前只是在较低的频率范围内使用,且一次只能测试一个方向的传递函数. 基于图像分析的光学传递函数测试技术,由计算机完成对特征目标物成像的预处理及分析,获得被测系统的光学传递函数^[5,6],测试采用正光路,不需要扫描机构,结构简单,测试结果可实时显示,整个测试过程不存在原理性误差,因而近年来发展很快. 以针孔作为特征目标物,可以同时获得子午和弧矢两个方向的光学传递函数^[7]. 本文首先从光锥的成像方式上讨论了其理论传递函数,提出了采用星点像分析的方法测试光锥的传递函数,给出了测试结果.

1 光锥的调制传递函数

光锥作为光学传像器件,不同于其他传统的光学器件,在传像的过程中有了离散化,但又不同于

CCD 器件在单个像元中有积分的过程,可以把这种情况看成多个圆形孔径与排列函数的卷积而不是抽样. 值得注意的是,因为是光锥,所以物、像存在一定的尺度比例,在计算频谱时,应该做相应的尺度变换,计算过程中,直接将像的空间尺度转换到物空间,得到统一空间频率的谱值.

无像差情况下,单根光纤具有很高的数值孔径,因而具有很高的 MTF 值,理想情况下趋近于 1. 实际情况中,MTF 主要来源于单根光纤中透过率的不一致和光纤排列方式. 光锥是由一束光纤排列制成,典型的排列方式为六角形,如图 1. 理想情况下,

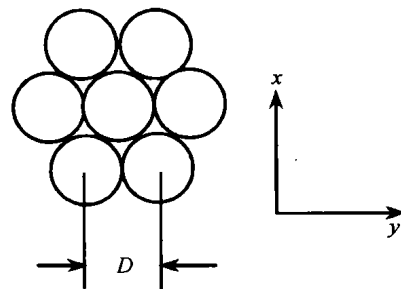


图 1 六角形排列的光锥端面
Fig. 1 Optical fiber arranged in hexagon

其分布函数是构成光锥 MTF 的主要因素,对于数值孔径为 1 的光锥,其理想 MTF 为

$$H_1(u, v) = \text{sinc} \left(\frac{\sqrt{3}\pi u D}{2} \right) \text{sinc} \left(\frac{\pi v D}{2} \right) \quad (1)$$

式中 D 为光锥入射端的单丝中心距,理想情况下等于单丝直径, $\frac{\sqrt{3}}{2}D$ 和 $\frac{1}{2}D$ 分别是光锥单丝沿 x 、 y 方向的排列间隔. 对于实验中测试的光锥, $D_x = 6.02 \mu\text{m}$, $D_y = 3.01 \mu\text{m}$, 其理论 MTF 如图 2. 从图中可以看处,光锥的截止频率是其排列间隔的倒数,从小端入射时,光锥的 MTF 值比从大端入射时高,且 y 方向的光学传递函数比 x 方向高.

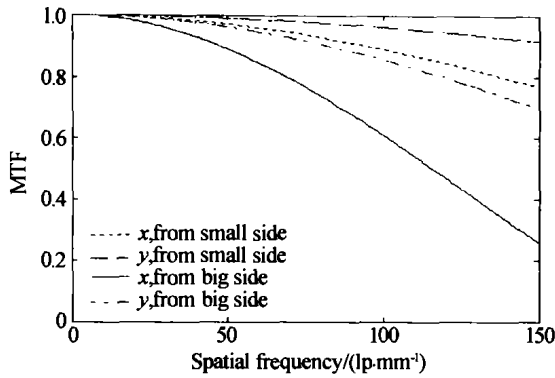


图2 被测光锥的理论 MTF
Fig. 2 Theoretic MTF of tested cone fiber optic bundle

2 测试实验

测试系统如图 3,非相干光源照明直径为 D_1 的针孔,针孔置于准直物镜焦平面上,经由参考物镜成像于光锥的前端面上,光锥将针孔像传出,由显微物镜放大,CCD 器件接受,由计算机实时计算出光锥的 MTF 值. 实验中,测试光源波长 546.1 nm,标准物镜为 50 mm 焦距平凸透镜,测试状态下相对孔径 F8,针孔直径 $80 \mu\text{m}$,显微物镜放大倍数 14.5,CCD 像元尺寸 $8.7 \mu\text{m} \times 8.7 \mu\text{m}$,平行光管焦距 1196.59 mm.

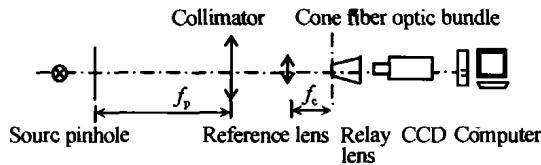


图3 测试系统示意图
Fig. 3 Test system schematic

在加入光锥前,具有特征频谱 $F(u, v)$ 的星点由参考透镜成像,输出图像的谱为 $G(u, v)$,根据线性不变系统理论,容易得到参考透镜的传递函数 $H'(u, v)$

$$H'(u, v) = G'(u, v) / F(u, v) \quad (2)$$

加入光锥,使参考透镜所成星点像位于光锥的前端面上,调节像分析器,使 CCD 采集到光锥后端面清晰的星点像. 根据二维傅立叶变换性质,对星点像沿 x, y 方向积分,再通过傅里叶变换,就得到最终星点像的频谱 $G(u), G(v)$,从而得到 x, y 方向上光锥与参考透镜总体的传递函数

$$\begin{aligned} H''(u) &= G(u) / F(u) \\ H''(v) &= G(v) / F(v) \end{aligned} \quad (3)$$

根据级联系统性质,光锥的传递函数则可按下式求得

$$\begin{aligned} H(u) &= H''(u) / H'(u) \\ H(v) &= H''(v) / H'(v) \end{aligned} \quad (4)$$

实验中,最终星点像的尺度,根据显微物镜和光锥的放大倍率统一在光锥的前端,即参考物镜的像平面、光锥的物平面上.

3 实验结果

采用文中的测试方法,首先测试了参考物镜的 MTF 值. 随后分别对光锥由大端入射和由小端入射的情况做了测试. 最终星点像的频谱如图 4,图 4(a)是由大端入射时的频谱,图 4(b)是由小端入射时的频谱. 从图中可以看出,标准物镜的截止频率决定了频谱图中的整体截止频率,实验中,标准物镜截止频率为 229 lp/mm,与图中的位置一致. 由于光锥中光纤的排列,引入了在排列频率处星点像频谱的复制, x, y 方向的排列频率分别为 $\frac{2}{\sqrt{3}D}$ 和 $\frac{2}{D}$,小

端入射时 x, y 方向的排列频率分别为 383.6 和 664.5,大端入射时 x, y 方向的排列频率分别为 191.8 和 332.2. 从图 4(b)看,由于大端入射时,排列频率小于标准物镜的截止频率,造成了频谱的严重混叠,从而造成了高频部分测试结果的整体偏高,结果不可信. 从上面的分析看,采用星点像分析测试光锥的 MTF 时,参考物镜的截止频率应小于入射端单丝在 x 方向排列频率,理想情况下为 $\frac{2}{D}$ 与最大测试频率的差值,大于最大测试频率,为了保证测试精度,还应该在测试频率范围内具有较高的 MTF 值. 实验中采用的测试系统,可以测试从小端入射时,光锥 150 lp/mm 内的 MTF,在多数情况下,这已经足够用了,然而要测试大端入射时光锥的 MTF

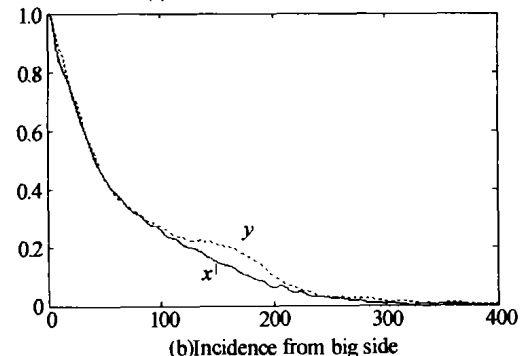
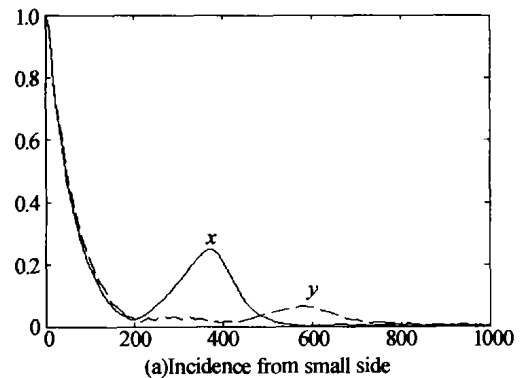


图4 加入光锥后最终星点像频谱
Fig. 4 Frequency of star image after adding cone fiber optic bundle

值,采用本系统设置是不行的,得选用大相对孔径的参考物镜,或是改变系统设置,增加星点像在光锥物平面的几何变换尺寸. 通过计算,要测试此光锥在 0~90 lp/mm 频率范围内从大端入射的 MTF,应选用成像质量良好的相对孔径为 18 : 1 的参考物镜,或是设置测试系统,使星点按几何光学换算到光锥物平面的直径为 11 μm .

CCD 采集的星点像如图 5,其中(a)、(b)、(c)分别为无光锥、加入光锥(大端入射)、加入光锥(小端入射),CCD 采集到的星点像,由于光锥具有改变物像比例的作用,星点像的尺度不同;(d)、(e)、(f)分别为三种情况下沿 x, y 方向的星点像能量积分分布,图中的空间尺度已做了修正.

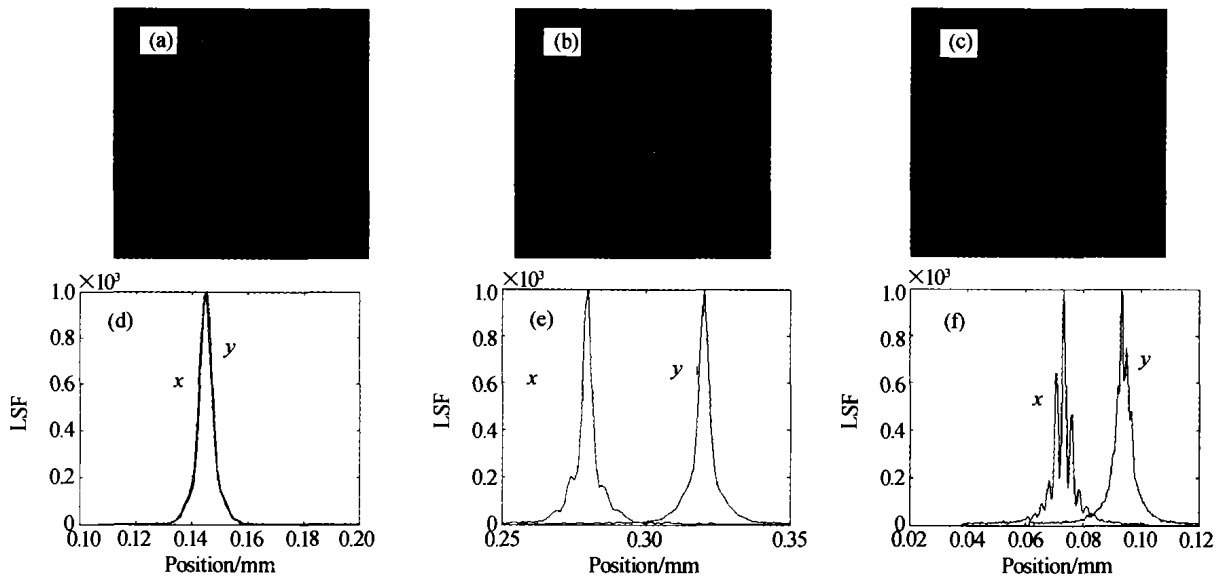


图 5 测试结果
Fig. 5 Test result

从图 5 可以看出文中测试的光锥单丝透过率不一致,由于存在串光现象,低频的 MTF 下降较快,尤其是从大端入射时,星点像能量积分分布曲线下端弥散较严重,引起的低频下降就更快. 图 6 是光锥从小端入射时的 MTF 测试结果,从图中可以看出,从小端入射时,MTF 测试值趋势与理论值一致,低频的快速下降是因为单丝之间的串光造成底部弥散. y 方向的 MTF 值优于 x 方向的 MTF 值,从星点像图中的单丝排列看,与理论分析状态相同,这表明测试结果与理论分析是一致的.

的 MTF,测试结果与理论分析具有一致性. 得到以下结论:

1)采用星点像分析的方法测试光锥的 MTF,频率校正非常重要,应根据光锥放大倍数,将星点像空间尺度校正到光锥物平面.

2)参考物镜的选择是得到可靠结果的关键,参考物镜的截止频率应小于光纤排列频率与最大测试频率的差值,大于测试频率,且在测试频率范围内具有较高的频谱,对于高排列频率的光锥或光纤面板,星点像分析方法具有明显优势. 对于单丝直径 3 μm 的光纤面板,采用文中的设置可以测试 150 lp/mm 范围内的光学传递函数.

3)从大端入射时,光锥的 MTF 值较从小端入射时高;子午方向和弧矢方向的传递函数不一致,主要是因为光纤沿两个方向的排列频率不同.

参考文献

- 1 庄松林,钱振帮. 光学传递函数. 北京:机械工业出版社,1981
Zhuang S L, Qian ZH B. Optical transform function. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981
- 2 江孝国,吴廷烈,王婉丽,等. 台阶测量 MTF 的误差分析. 光子学报,2000,29(Z1):185~190
Jiang X G, Wu T L, Wang W L, et al. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(Z1): 185~190
- 3 Tian W J, Zhang W, Ma W H, et al. Imaging

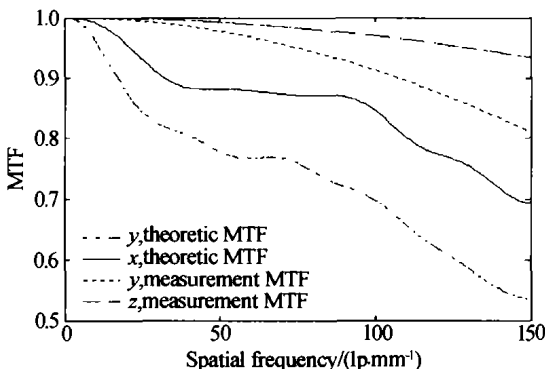


图 6 光锥小端入射时的 MTF
Fig. 6 MTF of cone fiber optic bundle with input from small side

4 结论

星点像分析法可以在较大频率范围内测试光锥

- performance evaluation for fiber optical plates. *Proceedings of SPIE*, 2000, **4927**: 193~198
- 4 阎丽,朱春祥,毛羽国,等. 光纤耦合成像系统的光学传递函数计算和分析. *光电工程*, 1996, **23**(1): 29~34
Yan L, Zhu Q X, Mao Y G, *et al.* *Opto-Electronic Engineering*, 1996, **23**(1): 29~34
- 5 Reimann David A, Jacobs Holly A, Samei Ehsan. Use of Wiener filtering in the measurement of the two-dimensional modulation transfer function. *Proceedings of SPIE*, 2000, **3977**: 670~680
- 6 Glenn Boreman. Transfer function in optical and electro-optical systems. *SPIE Press*, 2001, TT52
- 7 Leger Dominique, Duffaut Joel, Robinet Francoise. MTF measurement using spotlight. Proceedings of the 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena, USA. IEEE, 1994, 4: 2010 ~ 2012

Research on Optical Transfer Function Test of Cone Fiber Optic Bundle

Ma Weihong^{1,2}, Ma Zhen¹, Zhang Wei¹, Li Yingcai¹

¹ Space Optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

² Xi'an Institute of Technology, Xi'an

Received date: 2004-08-06

Abstract Theoretic optical transfer function (OTF) of cone fiber optic bundle are presented, by analyzing of image transfer manner and digital simulating, a OTF test method with spotlight image analyzing is proposed and experiment results agree well with theoretic analyzing. OTF of cone fiber optic bundle can be obtained at a large frequency range (larger than 100 lp/mm), by rational setting of test system parameter.

Keywords MTF; Cone fiber optic bundle; Pinhole image analyzing



Ma Weihong was born in 1976. He received the B. S. and M. S. degrees from Xi'an Institute of Technology in 2000. Now she is studying for her Ph. D. in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her major interests include optical testing and digital image processing.