

文章编号: 1005-5630(2007)02-0082-05

光学系统 MTF 测量中的自动背景校正方法*

李宏壮^{1,2}, 胡明鹏^{1,2}, 马冬梅¹, 张晓辉¹, 韩昌元¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为避免光学系统传递函数(MTF)测量中手动背景校正方法的诸多弊端, 提出了自动背景校正方法, 这种方法能够准确去除线扩散函数中的背景, 并且不受周围环境光照不稳定的影响。将这种方法应用在数字傅里叶法 MTF 测试中, 完成了对镜头 MTF 的测试。试验结果表明, 测试平均误差小于 5%。

关键词: 自动背景校正; 调制传递函数; 线扩散函数; 衍射极限

中图分类号: TB851 **文献标识码:** A

Automatic background correction in the MTF measurement of optical system

LI Hong-zhuang^{1,2}, HU Ming-peng^{1,2}, MA Dong-mei¹, ZHANG Xiao-hui¹, HAN Chang-yuan¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130022, China;

2. Chinese Academy of Sciences Graduates Institute, Beijing 100039, China)

Abstract: To avoid the defects of the manual background correction method in the modulation transfer function (MTF) measurement of optical system, the automatic background correction method was proposed. Through this method, the background of line spread function could be corrected properly, and this method has been resistant to the instability of lights in the environment. Then this method has been applied to the digital Fourier MTF measurement to complete the MTF measurement of lens. The experiment results show that the mean assessment error is less than 5%.

Key words: automatic background correction; modulation transfer function (MTF); line spread function (LSF); diffraction limited

1 引言

传递函数(MTF)反映了光学成像系统传递信息的频率特性, 以一个函数的形式定量地表示出了星点所提供的大量像质信息, 已被广泛应用于各种光学仪器的质量评价中。常用的 MTF 测量方法有扫描法和干涉法。扫描法是通过在像面上对系统的线扩散函数(LSF)进行扫描, 并对其进行傅里叶变换得到 MTF; 干涉法是通过干涉的方法得到系统的光瞳函数, 进而得到 MTF。在扫描法测量 MTF 中, 能否有效地去除像面上 LSF 的背景将直接影响测量的准确性。

在 MTF 的测量过程中, 背景的影响主要来源于周围环境光线的影响、目标板衬底遮光不完全等。目

* 收稿日期: 2006-06-26

作者简介: 李宏壮(1980-), 男, 黑龙江巴彦县人, 博士研究生, 主要从事航天遥感器像质评价及光学测试方法的研究。

前的测试方法中,多采用手动背景校正的方法:首先获得有背景影响的系统 LSF,而后将目标源(星点或狭缝等)挡住,获得背景信息,再将两幅图像或曲线相减,从而得到被测系统真实的 LSF。

该手动背景校正方法存在很多弊端,首先,由目标板衬底遮光不完全所产生的背景影响不能被消除;其次,当周围环境光照不稳定时,校正将产生错误;另外该方法测试速度慢,不利于测试工程的自动化。

现提出了 MTF 测量中的自动背景校正方法,它可以准确地去除背景影响,并能在周围环境光照不稳定的情况下进行测量。这种方法适用于接近衍射极限的小像差光学系统,文中将其应用在数字傅里叶法 MTF 测试中,完成了对镜头 MTF 的测试,试验结果表明,测试平均误差小于 5%。

2 自动背景校正方法原理

在 MTF 测试中,当获得的系统 LSF 背景校正不完全时,得到的 MTF 曲线在低频处迅速下降。相反,如果背景校正过多,则低频处 MTF 曲线下降过于平缓^[1],如图 1 所示。

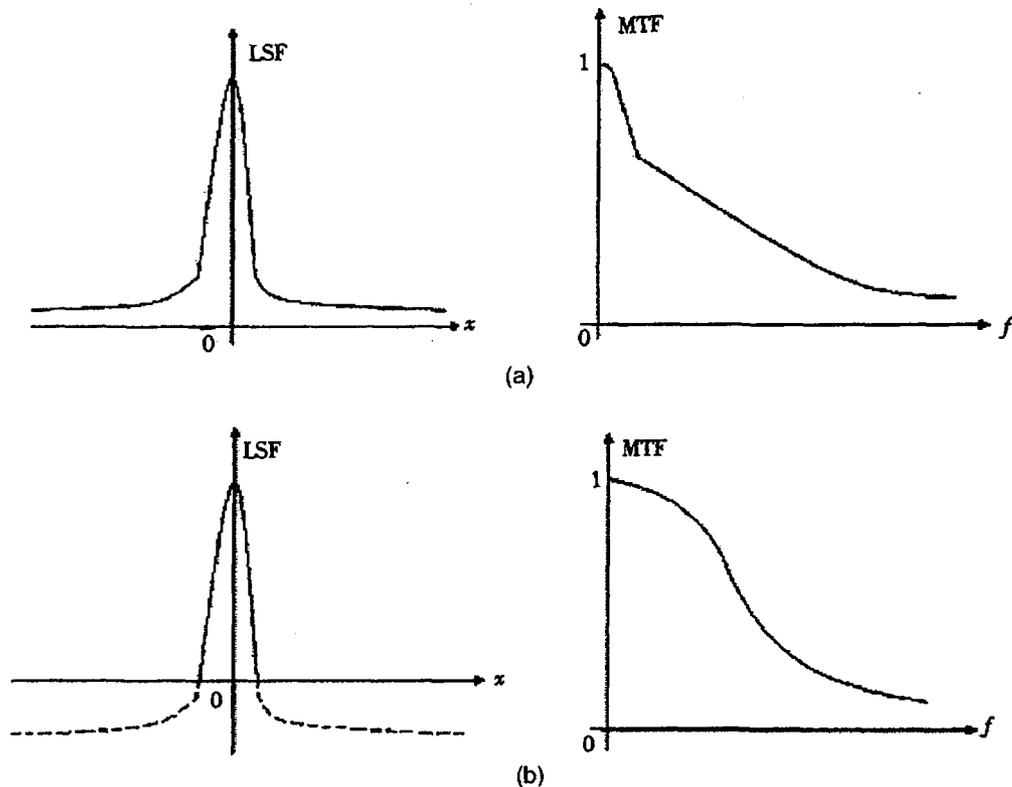


图 1 LSF 背景校正不同对 MTF 曲线的影响

(a)背景校正不足时的 LSF 和 MTF; (b)景背校正过头时的 LSF 和 MTF

对于衍射极限的圆形光瞳镜头,其传递函数为^[2]:

$$MTF(f) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{f}{f_0}\right) - \frac{f}{f_0} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \right] \quad (f < f_0) \quad (1)$$

式(1)中 f_0 是光学系统的非相干截止频率, $f_0 = \frac{D}{\lambda f} = \frac{1}{\lambda F}$, λ 是光波波长, f 是被测系统镜头焦距, D 是口径。

对式(1)微分可得:

$$\frac{\partial MTF(f)}{\partial f} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{1}{f_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} + \frac{1}{f_0} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} - \frac{f^2}{f_0^3} \left(1 - \frac{f}{f_0}\right)^{-1/2} \right] \quad (2)$$

MTF 曲线在 0 频处下降的斜率是:

$$\frac{\partial MTF(f=0)}{\partial f} = -\frac{4}{\pi f_0} = -\frac{4}{\pi} \lambda F \quad (3)$$

对于接近衍射极限的光学系统,各种像差在低频处的影响很小,因此其 MTF 曲线在 0 频处下降的斜率是固定值^[1],即:

$$s = \frac{\partial MTF(f=0)}{\partial f} = -\frac{4}{\pi f_0} = -\frac{4}{\pi} \lambda F \quad (4)$$

式(4)中 s 是 MTF 曲线在 0 频处下降的斜率。式(4)是镜头口径为圆形且无中心遮拦的情况;当口径不是圆形或有中心遮拦时, $s = -M\lambda \frac{f}{L}$, L 是与 MTF 测量方向(子午或弧矢)相垂直的方向上镜头的最大长度。参数 $M = \frac{L^2}{A}$, A 是镜头口径的面积。

将零频处和相邻的两个低频 f_1 、 f_2 之间的 MTF 曲线用二次方程表示:

$$MTF(f) = 1 + b_1 f + b_2 f^2 \quad (5)$$

令 $f_1 = \frac{1}{l}$, $f_2 = 2f_1$, l 是获得系统 LSF 时的扫描长度。则有:

$$MTF(f_1) = 1 + b_1 f_1 + b_2 f_1^2$$

$$MTF(f_2) = 1 + b_1 f_2 + b_2 f_2^2$$

$$\text{得: } b_1 = \frac{4MTF(f_1) - MTF(f_2) - 3}{2f_1}, b_2 = \frac{1 - 2MTF(f_1) + MTF(f_2)}{2f_1^2} \quad (6)$$

对式(5)微分有: $\frac{\partial MTF(f)}{\partial f} = b_1 + 2b_2 f$, 则 $\frac{\partial MTF(f=0)}{\partial f} = b_1$

即对于接近衍射极限的小像差系统,零频处的 MTF 曲线下降斜率为定值,即:

$$\frac{\partial MTF(f=0)}{\partial f} = b_1 = s \quad (7)$$

当测得的系统背景校正不完全时,得到的 MTF 曲线在零频处的斜率将低于 s ,而背景校正过头时,将高于 s ,这就是自动背景校正的原理。

3 试验过程与结果分析

采用数字傅里叶法对标准镜头进行 MTF 测量,以验证自动背景校正方法的准确性。

3.1 数据采集

实验框图如图 2 所示,将狭缝目标板放在准直光管的焦面处,在被测镜头后放 20× 显微镜,将狭缝像放大 20× 后成像在 CCD 上,这样可以消除由于 CCD 尺寸引起的频谱混叠^[3~5]。狭缝像输入计算机后,就可以进行数字处理,计算 MTF 了,试验使用的镜头为圆形口径的标准镜头,其 MTF 是已知的。

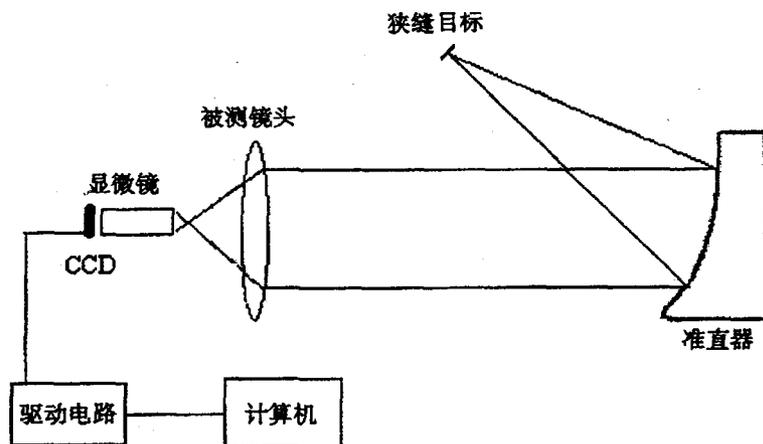


图 2 实验框图

3.2 数据处理

3.2.1 噪声与随机误差的去除

通过多帧图像平均的方法可以去除噪声影响^[3]。

由于实测的数据带有随机误差,根据线扩散函数曲线的形状,采用五点三次平滑进行处理,在每个数据点的前后各取两个相邻的点,用三次多项式进行逼近:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (8)$$

根据最小二乘原理确定系数 a_0, a_1, a_2, a_3 , 最后可得五点三次平滑公式:

$$\begin{aligned} \overline{y_{i-2}} &= (69y_{i-2} + 4y_{i-1} - 6y_i - 4y_{i+1} - y_{i+2}) / 70 \\ \overline{y_{i-1}} &= (2y_{i-2} + 27y_{i-1} + 12y_i - 8y_{i+1} + 2y_{i+2}) / 35 \\ \overline{y_i} &= (-3y_{i-2} + 12y_{i-1} + 17y_i + 12y_{i+1} - 3y_{i+2}) / 35 \\ \overline{y_{i+1}} &= (2y_{i-2} - 8y_{i-1} + 12y_i + 27y_{i+1} + 2y_{i+2}) / 35 \\ \overline{y_{i+2}} &= (-y_{i-2} + 4y_{i-1} - 6y_i + 4y_{i+1} + 69y_{i+2}) / 70 \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中 $\overline{y_i}$ 表示 y_i 的平滑值。通过五点三次平滑处理后,减少了数据的随机误差。

3.2.2 背景校正

采用自动背景校正方法,去除 LSF 中的背景影响。具体方法是:对于获得的线扩散函数 LSF,经过傅里叶变换后得到 MTF 曲线^[6,7],再通过式(6)、式(7)计算出其在零频处下降的斜率 b_1 ,与式(4)的镜头的理论斜率比较 s ,当 b_1 大于 s 时,表明系统背景校正不完全,继续对 LSF 去除背景,直到 b_1 与 s 相等为止,如图 3 所示。这时得到的 MTF 曲线即为系统的真实 MTF 曲线。

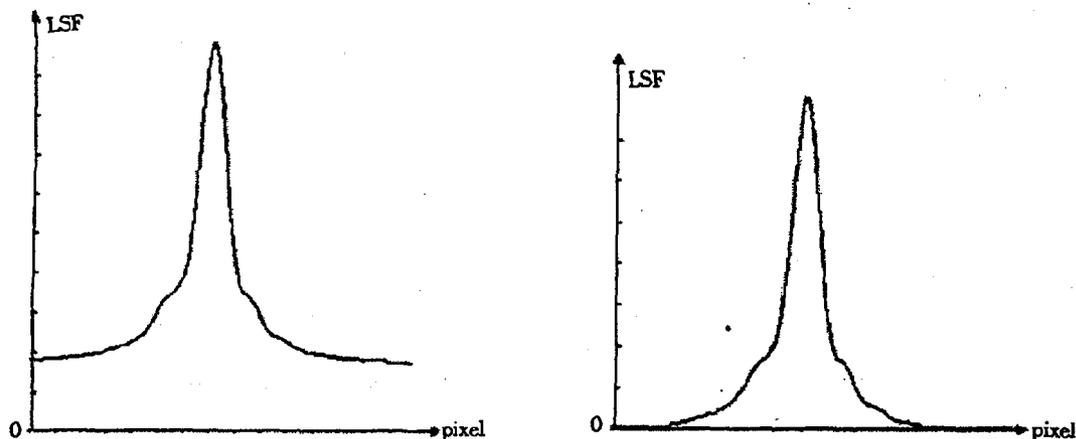


图 3 背景校正前后的 LSF

3.2.3 MTF 曲线的修正

$$\text{由} \quad MTF_{\text{raw data}} = MTF_{\text{object}} \times MTF_{\text{lens}} \times MTF_{\text{microscope}} \times MTF_{\text{CCD}} \quad (10)$$

由于显微镜的放大倍数为 20 倍,因此 $MTF_{\text{microscope}} = MTF_{\text{CCD}} \approx 1$,可以不予考虑。

$$\text{因此} \quad MTF_{\text{lens}} = \frac{MTF_{\text{raw data}}}{MTF_{\text{object}}} \quad (11)$$

对于狭缝目标

$$MTF_{\text{object}}(f) = \text{sinc}(\pi af) = \frac{\sin(\pi af)}{\pi af} \quad (12)$$

式(12)中 a 是狭缝像的宽度, f 是空间频率。

经过修正后的镜头 MTF 曲线如图 4 所示,由于被测镜头是标准镜头,故经过与已知的 MTF 比较,平均测试误差小于 5%。

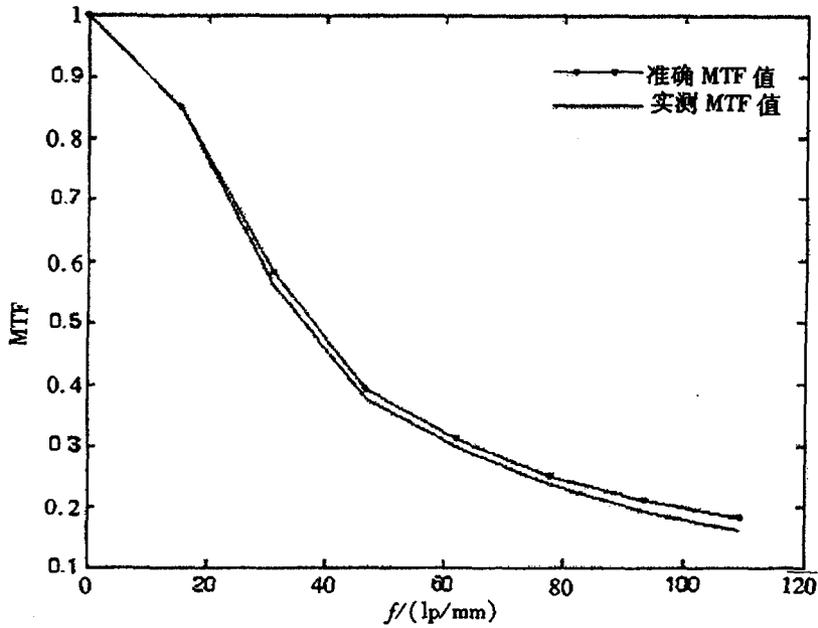


图 4 测出的标准镜头 MTF 曲线

4 结论

分析了自动背景校正方法在光学系统 MTF 测试中的应用,这种方法适用于接近衍射极限的小像差光学系统。试验结果表明,这种方法准确可靠,不受周围环境光照影响,可以简化 MTF 的测试步骤,提高测试的精确度和速度,便于测量的自动化。

参考文献

- [1] Williams T L. *The Optical Transfer Function of Imaging Systems*[M]. Netherlands; Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 1999, 345—550.
- [2] 韩昌元. 信息光学基础理论及其应用[M]. 长春: 长春出版社, 1989, 83—90.
- [3] Chambon M, Primot J, Girard M. Modulation Transfer Function assessment for sample imaging system: application of the Generalize Line Spread Function to a widespread infrared camera[J]. *SPIE*, 1995, 2047: 325—334.
- [4] Kao Y H, Albert M, Carton A K, *et al.*. A software tool for measurement of the Modulation Transfer Function[J]. *SPIE*, 2005, 5745: 1199—1208.
- [5] Pruchnic S J, Mayott G P. Measurements of Optical Transfer Function of discretely sample thermal imaging systems[J]. *SPIE*, 1992: 1689, 368—378.
- [6] 林逸群, 李正民, 包正康. 一种新型 OTF 测试仪[J]. *仪器仪表学报*, 1990, 11(1): 9—14.
- [7] 全文权. 红外系统 MTF 测试仪技术分析[J]. *红外*, 2003, 24(4): 16—22.