

doi:10.3788/gzxb20144312.1212003

二维调制传递函数及其在波前差检测方面的应用

康吉强¹,程雪岷¹,郝群²

(1 清华大学 深圳研究生院,广东 深圳 518055)

(2 北京理工大学 光电学院,北京 100081)

摘 要:光学系统像质分析在光学系统设计、加工和装调过程中具有重要意义.像质分析常用的方法有调制传递函数法和波前差法.对于高分辨率光学系统,传统的一维调制传递函数由于只提供了一维空间频率信息,因此在像质检测时有一定的局限性.本文基于随机数图像的傅里叶功率谱密度理论,提出了一种利用随机数图像作为目标物来测量成像光学系统二维调制传递函数的方法;通过利用 Newton-Cotes 求积公式,对有像差系统的光学传递函数计算公式做进一步推导,提出了利用实际成像光学系统的二维调制传递函数值直接计算系统波前差的算法.实验结果表明,二维调制传递函数较之一维调制传递函数更能真实地反应成像光学系统的成像性能;利用二维调制传递函数计算得到的波前差与理论波前差在轮廓上有较好的一致性,可以作为实际系统波前差分析的一条新途径.

关键词:几何光学;像质分析;波前差;调制传递函数;随机图像;功率谱密度;数值积分

中图分类号:TH741.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)12-1212003-7

Two Dimensional Modulation Transfer Function and Its Application in Wavefront Aberration Detection

KANG Ji-qiang¹, CHENG Xue-min¹, HAO Qun²

(1 Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

(2 School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Image quality evaluation is an important work to optical system design and manufacture. Generally, modulation transfer function and wavefront aberration are two common evaluation ways. For high resolution optical systems, the traditional one-dimensional modulation transfer function has some shortcomings when evaluating their image quality because it only provide one dimensional spatial frequency information. Based on the Fourier power spectrum density theory of random images, a method to measure the two-dimensional modulation transfer function of optical systems was proposed by setting random images as the target. An algorithm of using two-dimensional modulation transfer function to calculate the wavefront aberration directly was developed through simplifying the formula of optical transfer function. In this part, the Newton-Cotes integral formula was used. The experimental results show that the two-dimensional modulation transfer function is better than the one-dimensional modulation transfer function in revealing the true characteristics of imaging optical systems, and that the wavefront aberration calculated with the algorithm have the same contour with the theoretical wavefront aberration. It can be a potential way to measure wavefront aberration of optical systems.

Key words: Geometric optics; Image quality evaluation; Wavefront aberration; Modulation transfer function; Random image; Power spectral density; Numerical integration

OCIS Codes: 120.4630; 080.0080; 110.4100; 080.1753; 220.4840

基金项目:国家自然科学基金 (Nos. 61275003, 51327005)、广东省专项资金 (No. 2012B091100014) 和深圳市科技计划 (No. ZDSY20120619141243215) 资助

第一作者:康吉强(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为非球面光学系统设计. Email:jiqiangkang@gmail.com

导师(通讯作者):程雪岷(1976-),女,副教授,博士,主要研究方向为技术光学. Email:cheng-xm@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2014-04-14; **录用日期:**2014-07-01

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

光学传递函数是评价成像光学系统成像性能的一种比较完善的量化技术指标,它的模值即为调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF),是评价光学系统分辨能力的一个重要测度,在光学系统像质检测中已获得广泛应用^[1].另外,调制传递函数在医疗放射成像系统的成像性能分析方面也有广泛的应用,如计算机放射成像系统的像质检测等.

目前调制传递函数的主要测量方法有刀口检测方法、狭缝检测方法、干涉法以及随机目标物法^[2-7]等.这些方法的测量目标一般是待测系统某个方向(水平或垂直)的调制传递函数,即一维调制传递函数(One-dimensional Modulation Transfer Function, 1D MTF).Haim H 等人分析了利用棋盘格形式的二维目标物来测量光学系统某一方向的对比度传递函数(Contrast Transfer Function, CTF)的方法,结果表明二维目标物较之传统目标物更能反应成像系统在该方向的实际对比度特性^[8-9],这对对比度要求较高的系统具有重要检测意义,例如条码检测光学系统^[10].Fetterly K. A. 等人以钻有一定数量小孔的铜板作为靶标,利用放射成像系统对其多次成像,然后计算系统的二维调制传递函数(Two-dimensional Modulation Transfer Function, 2D MTF)以分析该类系统的成像性能^[11].Wells J. R. 等人则提出了一种利用一维目标物来测量放射成像系统 2D MTF 的方法^[12].2D MTF 较之 1D MTF 能更全面地反应系统的成像特性.值得一提的是,放射成像系统与本文分析的成像系统有一些差异,这主要体现在二者工作的波段不同,前者一般工作在 X 射线波段,而后者工作在可见光波段;此外,前者调制传递函数所分析的空间频率一般较低(<10 cycles/mm),而后者分析的空间频率一般较高(>30 cycles/mm).

目前波前差检测主要有两种方式,一种是基于光学干涉原理的干涉仪,另一种是基于哈特曼-夏克测量原理的哈特曼-夏克波前传感器.干涉仪由于应用了光学干涉原理,在检测时具有测试准确度高,测试信息全的特点,此外干涉仪品种齐全,用户可以根据测量需要选择合适的干涉仪^[13].哈特曼-夏克波前传感器较之干涉仪具有结构简单、对测量光的相干性没有要求并且可以实时记录波前变化的特点,目前已经广泛应用于实时波前检测领域^[14].本文基于频域二元复函数形式的调制传递函数与空域二元实函数形式的波前差之间的关系^[15],推导了以实函数形式表达的两者之间的关系式.利用 2D MTF 的频域信息,构建了以泽尼克拟合系数为变量的超越方程组,通过数值计算得到了系统波前差的拟合方程.本文提出的方法在获得光学系统

2D MTF 的同时,计算得到系统波前差,为光学系统像质评价提供了一种新的途径.仿真和实际计算结果表明,计算得到的波前差与理论波前差在轮廓上有较好的一致性.

1 随机数图像测量 2D MTF 的原理

2D MTF 是相对 1D MTF 而言的.1D MTF 分析物面上某个方向不同空间频率的光波经过系统后强度变化情况,例如子午方向或者弧矢方向的调制传递函数.在频域上,1D MTF 是一条曲线;2D MTF 则通过将物面上任意方向的不同空间频率的光波分解到两个正交方向上,从而实现对任意方向不同空间频率的光波经过系统后强度变化情况进行分析.在频域上,2D MTF 是一张曲面.

近年来,利用随机数图像结合电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)测量光学系统调制传递函数的方法获得了广泛的应用.其原因是,随机数图像可以满足测量平移不变性,使得测量过程不需要机械扫描机构,从而提高了测量速度^[6-7].同时,这一特性的存在也降低了显示屏、待测光学系统和 CCD 之间的共轴要求.

随机数图像是指功率谱密度分布近似为白噪声的图像信号,图像包含的各频率分量的功率谱密度围绕某个值上下小幅波动.随机数图像因其自身的随机特性,在利用随机数图像测试 MTF 时需要采集大量的随机数图像,然后再求功率谱密度的平均才能正确反应待测系统的 MTF 特性.为了在测试过程中更换大量随机数图像而不影响测试,可以采用由计算机生成一系列随机数图像,然后在液晶屏上逐一显示的方式进行测量.测量过程如图 1 所示,其中显示器 1 用于显示图像采集和数据处理过程,显示器 2 用于显示随机数图像.

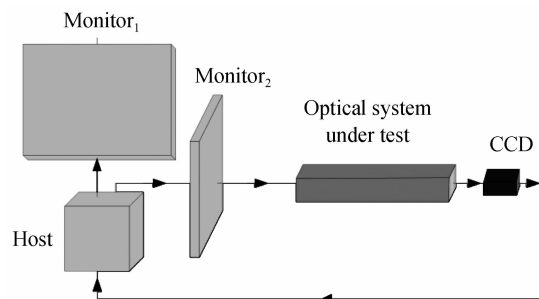


图 1 实验过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental procedure

假设液晶屏的像素间距为 L ,待测光学系统的放大倍率为 M ,CCD 的像元大小为 $D \times D$.则液晶屏在待测光学系统像面处的最高空间频率为 $f_{\max} = 1/(2 \times L \times M)$,CCD 的奈奎斯特频率为 $f_N = 1/(2 \times D)$.根据采样定理,有 $f_{\max} < f_N$.测试系统的器

件选型需要满足采样定理,否则会测试结果带来一定误差^[16-17].

假设矩阵 \mathbf{H} 表示一张 $N \times N$ 像素的随机数图像,则随机数图像的二维功率谱密度的计算公式为

$$\text{PSD}\mathbf{H} = \text{abs}(\text{FFT2}\mathbf{H})^2 / (N \cdot N) \quad (1)$$

式中 FFT2 函数为二维傅里叶变换函数,abs 函数对傅里叶变换结果取模.

假设屏幕上随机数图像的二维功率谱密度为 $\text{PSD}_0(\xi, \eta)$,待测光学系统的 2D MTF 为 $\text{MTF}_{\text{opt}}(\xi, \eta)$,液晶屏与 CCD 组成系统的 2D MTF 为 $\text{MTF}_{\text{sys}}(\xi, \eta)$,CCD 采集到的随机数图像的像的功率谱密度为 $\text{PSD}_i(\xi, \eta)$.那么对于任意空间频率 (ξ, η) 可表示为

$$\text{PSD}_i(\xi, \eta) = \text{MTF}_{\text{opt}}^2(\xi, \eta) \cdot \text{MTF}_{\text{sys}}^2(\xi, \eta) \cdot \text{PSD}_0(\xi, \eta) \quad (2)$$

式中 $\text{MTF}_{\text{sys}}(\xi, \eta)$ 是系统固有的 MTF 特性,它集中反映了显示屏和 CCD 的各种缺陷对 MTF 响应的影响,如像素尺寸不均匀性、像元感光能力不均匀性等,这一参量在实验中需要单独测量^[18-21].另外,在实际测量的过程中,由于环境光的干扰以及 CCD 暗电流的存在,会给测试过程带来额外的干扰噪音.为了确定系统的干扰噪音,需要测量一系列零频图像(单色图像)经待测光学系统后,在 CCD 上成像的图像的功率谱密度,设为 $\text{PSD}_n(\xi, \eta)$.在计算时用随机数图像的功率谱密度减去该功率谱密度,尽可能提高测量信噪比,即

$$\text{MTF}_{\text{opt}}^2(\xi, \eta) = \frac{[\text{PSD}_i(\xi, \eta) - \text{PSD}_n(\xi, \eta)]}{\text{MTF}_{\text{sys}}^2(\xi, \eta) \cdot \text{PSD}_0(\xi, \eta)} \quad (3)$$

在实验中测量出式(3)右边各项,就可以计算得到待测光学系统的 2D MTF.

2 利用 2D MTF 计算波前差的算法

有像差系统的光学传递函数计算公式为

$$H(\xi, \eta) = \frac{\iint_{S(\xi, \eta)} \exp[-jkW(x, y)] \cdot \exp[jkW(x + \lambda d\xi, y + \lambda d\eta)] dx dy}{S_0} \quad (4)$$

式中 (ξ, η) 为频域坐标, S_0 为系统出瞳面积, $S(\xi, \eta)$ 为相对于原始出瞳偏移 $(-\lambda d\xi, -\lambda d\eta)$ 的新出瞳与原始出瞳的重叠区域, k 为波矢, λ 为波长并且有 $k = 2\pi/\lambda$, d 为出瞳到像面的距离, $W(x, y)$ 为出瞳处实际波前相对于理想波前的偏差.

对式(4)的被积函数进行变换,假设

$$A(x, y) = W(x + \lambda d\xi, y + \lambda d\eta) - W(x, y) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)并且用欧拉公式展开得

$$\mathbf{H}(\xi, \eta) = \frac{\iint_{S(\xi, \eta)} \cos[kA(x, y)] dx dy}{S_0} + j \cdot \frac{\iint_{S(\xi, \eta)} \sin[kA(x, y)] dx dy}{S_0} \quad (6)$$

由式(6)可以看出有像差系统的传递函数是一个复数,它表征了系统的幅度和相位传递特性.为了得到调制传递函数的计算公式,只需要对式(6)取模即可.假设

$$\mathbf{B} = \frac{\iint_{S(\xi, \eta)} \cos[kA(x, y)] dx dy}{S_0} \quad (7)$$

$$\mathbf{C} = \frac{\iint_{S(\xi, \eta)} \sin[kA(x, y)] dx dy}{S_0} \quad (8)$$

则调制传递函数的计算公式为

$$\mathbf{M}(\xi, \eta) = |\mathbf{H}(\xi, \eta)| = \sqrt{B^2 + C^2} \quad (9)$$

式(9)建立了频域二元实函数 $M(\xi, \eta)$ 与空域二元实函数 $W(x, y)$ 之间的函数关系.为了求得空域二元实函数 $W(x, y)$,需要确定频域二元实函数 $M(\xi, \eta)$,即 2D MTF.如果仅有频域一元实函数 $M(\zeta)$,即 1D MTF,由于少了一个频率分量信息而无法计算 $W(x, y)$.对于实际系统,式(9)左边的项可以通过 2D MTF 测量方法测量得到,因此如果将式(9)右边项中的波前差 $W(x, y)$ 利用某个正交函数集进行拟合,那么将一个测量数据点代入式(9)中就可以得到一个只含有拟合系数的方程,如果代入足够多的测量数据点,就可以构成一个以拟合系数为变量的方程组,解这个方程组得到拟合系数后,就可以得到波前差的表达式.

泽尼克多项式由于在单位圆内具有完备正交性以及与赛德像差的对应关系,使之在波前拟合中获得了广泛应用,一些常用光学设计软件,如 CODE V,可以在设计阶段就给出系统波前差的泽尼克多项式拟合结果.此外,与一般多项式加权最小二乘拟合法相比,泽尼克多项式拟合法具有拟合系数更为简单、结果更加可靠的性质^[22].假设采用 N 项泽尼克多项式来拟合波前差,则有

$$W(x, y) = \sum_{i=0}^N a_i z_i \quad (10)$$

式中 a_i 为第 i 项泽尼克多项式拟合系数, z_i 为第 i 项泽尼克多项式.将式(10)代入式(5)得

$$A(x, y) = \sum_{i=0}^N a_i [z_i(x + \lambda d\xi, y + \lambda d\eta) - z_i(x, y)] \quad (11)$$

将式(11)代入式(7)、(8)有

$$B = \frac{\iint_{S(\xi, \eta)} \cos\left\{k \cdot \sum_{i=0}^N a_i [z_i(x + \lambda d\xi, y + \lambda d\eta) - z_i(x, y)]\right\} dx dy}{S_0} \quad (12)$$

$$C = \frac{\iint_{S(\xi, \eta)} \sin\left\{k \cdot \sum_{i=0}^N a_i [z_i(x + \lambda d\xi, y + \lambda d\eta) - z_i(x, y)]\right\} dx dy}{S_0} \quad (13)$$

重写式(9)如下

$$M^2(\xi, \eta) = B^2 + C^2 \quad (14)$$

由式(14)可以看出,若将一系列 MTF 测试数据点代入式(14),得到的求拟合系数的方程组将是一个复杂的积分方程组.由于方程组不是传统的线性方程组,因而不能采用线性方程组的求解思路,而只能采用数

值求解的方式求解拟合系数.此外,要利用数值求解方法求解以拟合系数为变量的方程组,还需要将式(14)中的积分项求解出来.本文采用 Newton-Cotes 求积公式来求解 B 和 C 中的二重积分.

Newton-Cotes 求积公式是数值积分的一个有效途径,Newton-Cotes 求积公式为^[23]

$$\int_a^b f(x) dx \approx (b-a) \sum_{k=0}^n c_k^{(n)} f(x_k) \quad (15)$$

式中 $[a, b]$ 为积分区间并被 n 等分, $f(x)$ 为被积函数, $c_k^{(n)}$ 称为 Cotes 求积系数,是一组与被积函数和积分域无关的常量. Newton-Cotes 求积公式在 $n \leq 7$ 时是数值稳定的,当 $n \geq 8$ 时由于系数 $c_k^{(n)}$ 较大并且有正有负,此时由于相互抵消会导致数值不稳定.因此不妨采用 $n=7$ 时的 Newton-Cotes 求积公式进行分析,此时 $c_k^{(n)}$ 的具体数值见表 1.

表 1 $n=7$ 时的 Cotes 求积系数

Table 1 Cotes quadrature coefficients, $n=7$

n	$k=0$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	$k=6$	$k=7$
7	$\frac{751}{17280}$	$\frac{3577}{17280}$	$\frac{1323}{17280}$	$\frac{2989}{17280}$	$\frac{2989}{17280}$	$\frac{1323}{17280}$	$\frac{3577}{17280}$	$\frac{751}{17280}$

由于 Newton-Cotes 求积公式只描述了一重积分的情况,要利用它来求解 B 和 C 中的二重积分则需要将二重积分转换成两次一重积分进行求解.

利用 Newton-Cotes 求积公式求出 B 和 C 的二重积分后, B 和 C 的分子是代数表达式,即

$$B' = (b-a) \cdot \sum_{k_2=0}^7 c_{k_2}^{(n)} \cdot \left\{ (c-d) \cdot \sum_{k_1=0}^7 c_{k_1}^{(n)} \cdot \cos [k \cdot A(x_{k_1}, y_{k_2})] \right\} \quad (16)$$

$$C' = (b-a) \cdot \sum_{k_2=0}^7 c_{k_2}^{(n)} \cdot \left\{ (c-d) \cdot \sum_{k_1=0}^7 c_{k_1}^{(n)} \cdot \sin [k \cdot A(x_{k_1}, y_{k_2})] \right\} \quad (17)$$

式中 a, b 是对变量 y 求积分时的积分上下限, c, d 是对变量 x 求积分时的上下限.将式(14)重写为

$$S_0^2 \cdot M^2(\xi, \eta) = (B')^2 + (C')^2 \quad (18)$$

式(18)是利用 2D MTF 进行波前差计算的最终代数表达式.只要选择一组 2D MTF 数据代入式(18)中,就可以得到一组只含有泽尼克多项式拟合系数的方程,将这些方程联立成方程组,就可以求解泽尼克拟合系数,从而得到波前差的表达式.

3 实验及结果分析

3.1 2D MTF 测量实验装置及过程

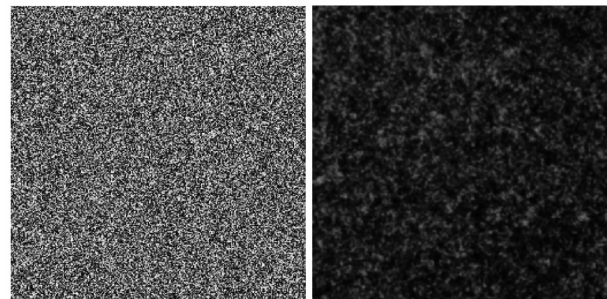
实验采用的显示屏为三星 SyncMaster E1920W,该款显示器的像素间距为 0.283 5 mm,总像素为 1 440×900. CCD 采用 Sony 1/4 inch ICX618,其像元大小为 5.6 μm×5.6 μm,像素数为 656×492.根据采样定理,可以由显示屏和 CCD 确定待测光学系统的最小放大倍率为 0.019 8.实验光学系统参量见表 2.

表 2 光学系统参量

Table 2 The parameters of optical system

X FOV/ (°)	Y FOV/ (°)	Entrance pupil/mm	Exit pupil/mm	EFL/ mm	Reduction ratio
6.26	6.26	3	5.3	22.32	0.025

实验过程中需要调节显示屏、待测系统和 CCD 三者共轴.为此,首先调节显示屏和 CCD 使得二者垂直于水平面,然后生成一幅十字图像并显示在显示屏上,观察 CCD 采集到的图像并调节 CCD 的位置,使得十字图像经过待测光学系统后,十字像的中心与 CCD 的中心重合,此时三者共轴.为了获得足够的空域信息,实验对随机产生的 100 张零频图片和 1 500 张随机数图像进行测量.实验中一组原始随机数图像和 CCD 采集到图像分别见图 2(a)和图 2(b).



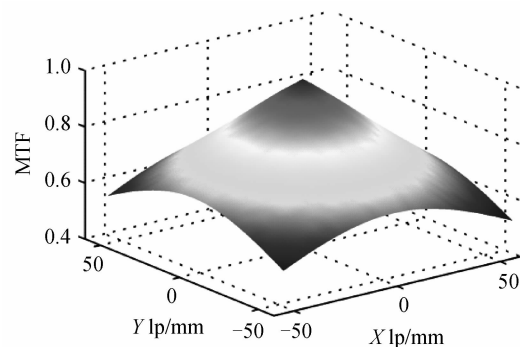
(a) Original random image (b) Image captured by CCD

图 2 原始随机数图像和 CCD 采集到的随机数图像
Fig. 2 Original random image and the image captured by CCD

对所有原始随机数图像和 CCD 采集到的零频图像、随机数图像分别利用式(1)求二维功率谱密度后求算术平均可以得到式(3)右边各项的值,从而可以计算出待测光学系统的 2D MTF.

实验光学系统 2D MTF 的理论值,可以利用 CODE V 计算得到.实验系统 2D MTF 的理论值和测量值分别见图 3(a)、图 3(b).

将图 3(a)、图 3(b)中 XOZ 平面的截线对比示于图 3(c)中,可以发现测量值相对于理论值有一定的偏差,这表示实际光学系统的像质与理论像质有一定的偏差.将 CCD 采集到的随机数图像与原始图像对比可以看出计算结果是合理的.



(a) Computing values of 2D MTF

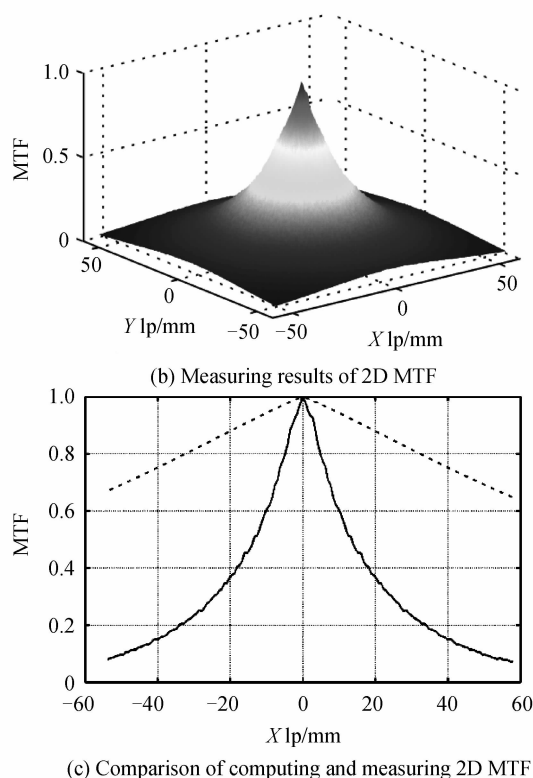


图3 理论和测量 2D MTF 及其在 XOZ 平面的对比(虚线表示理论值,实线表示测量值)
 Fig. 3 Computing and measuring 2D MTF and comparison of them in XOZ plane (dash line represents the computing values, solid line shows the measuring results)

3.2 1D MTF 和 2D MTF 的比较

待测实验光学系统的 1D MTF 可以根据已有的利用随机数图像测量 1D MTF 的方法进行测量^[24]. 将 1D MTF 和 2D MTF 对应方向的截线对比示于图 4, 其中虚线代表 1D MTF, 实线代表 2D MTF 对应方向的截线.

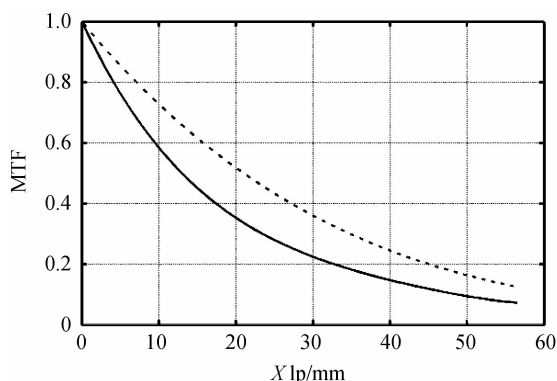


图4 1D MTF 与对应的 2D MTF 曲面截线
 Fig. 4 1D MTF (red dash line) and its counterpart on 2D MTF surface (blue solid line)

从图 4 中可以看出两条曲线并不重合. 导致这一结果的原因是, 在一次计算中, 1D MTF 的计算只用到

了随机数图像的某一行(列)随机数据, 而将这一行(列)各数据点在列(行)方向的扩展值视为相等, 事实上, 这一行(列)各数据点在列(行)方向的扩展值也是随机值; 2D MTF 的计算则同时涵盖了两个方向的随机过程, 将图像视为一个整体进行分析, 能更全面地揭示随机数图像的功率谱密度特征. 从信息利用的角度而言, 1D MTF 只用了随机数图像一个方向的信息, 而 2D MTF 利用了两个方向的信息, 因此 2D MTF 较之 1D MTF 能更真实地反应成像系统的成像特性.

3.3 波前差计算

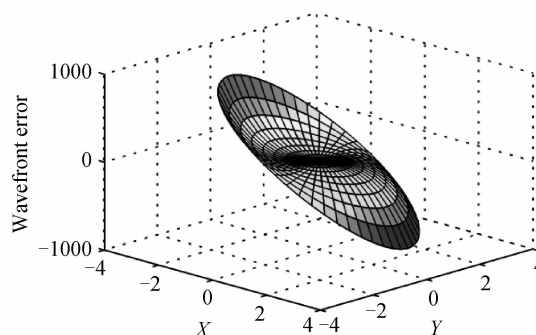
得到待测系统 2D MTF 的理论和测试结果后, 在结果中选择一系列的点, 代入式(18)可以得到用于求解泽尼克拟合系数的方程组. 考虑到计算的复杂性和有效性, 本文采用前 10 项泽尼克多项式进行拟合. 选择数据点时, 为了使得计算结果尽可能的准确, 本文选择 15 个数据点构建由 15 个方程组成的方程组求解泽尼克拟合系数.

由式(16)、(17)、(18)可以看出, 待求解的方程组由 15 个超越方程组成, 并且每个超越方程的形式都异常复杂. 要推导 15 个超越方程的具体表达式, 然后再利用 MATLAB 进行数值求解, 会带来很大的工作量且容易出错. 为了解决这个矛盾, 本文利用 MATLAB 强大的符号运算功能, 自动推导各超越方程的表达式, 然后将各超越方程的表达式写入 txt 文件保存.

得到超越方程组的表达式后需要求解泽尼克拟合系数. 由于超越方程组的求解受初值的影响很大, 本文借助 1stOpt 数值分析软件, 利用其不用给出初始值的情况下, 可以用通用全局优化算法求解复杂的超越方程组的特点, 对本文待求解的超越方程进行求解.

图 5 表示 CODE V 拟合的波前差和算法计算的波前差. 其中图 5(a)表示拟合波前差; 图 5(b)表示由 2D MTF 理论值计算的波前差; 图 5(c)表示由 2D MTF 测量值计算的波前差.

由图 5(a)和图 5(b)可以看出, 利用 2D MTF 理论值计算得到的波前差与 CODE V 拟合的波前差在轮廓上有较好的一致性.



(a) Wavefront aberration fitted in CODE V

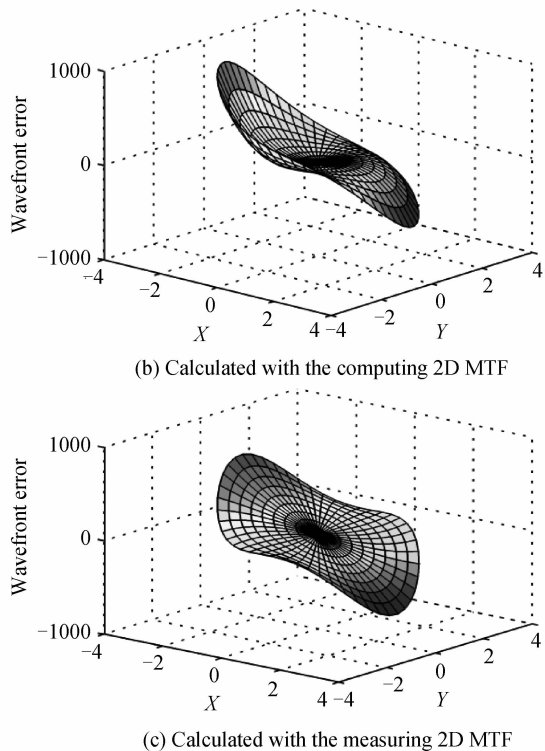


图5 CODE V拟合的波前差和算法计算的波前差

Fig. 5 Wavefront aberration fitted in CODE V and calculated with the algorithm

4 结论

本文提出的方法为光学系统像质评价提供了一条新的途径. 利用随机数图像测量成像光学系统 2D MTF, 并通过与 1D MTF 对比可以发现, 2D MTF 更能真实地反应成像系统的成像性能. 基于 2D MTF 理论, 本文讨论了 2D MTF 在波前差检测方面的应用, 即利用光学系统的 2D MTF 测量值直接计算系统波前差. 计算结果和理论结果在轮廓上有较好的一致性. 在下一阶段的工作中, 将针对实用化做一些探讨, 如超越方程组本身比较复杂, 在数值求解时很难收敛, 而导致计算结果和理论结果不能完全一致, 因此在实际应用中需要寻求更为有效的求解复杂超越方程组的算法. 对于实际系统, 由于各种误差的存在, 会使得实际像质与理论像质有偏差. 此时, 如果利用实际系统的 2D MTF 测量结果, 并结合 2D MTF 计算波前差的算法, 那么无需利用其他的波前差检测手段就可以直接求得实际系统的波前差, 如图 5(c), 从而可以实现对系统所存在的误差类型进行综合判断.

参考文献

[1] ZHANG Xu-sheng, SHA Ding-guo. Method for modulation transfer function measurement of linear sampled imaging system using random bar targets[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 918-922.
张旭升, 沙定国. 线性离散成像系统调制传递函数的随机条纹测试法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 918-922.

[2] BOREMAN G, DERENIAK E L. Method for measuring modulation transfer function of charge-coupled devices using laser speckle[J]. *Optical Engineering*, 1986, **25**(1): 250148-250148.

[3] ZHOU Jie, QIU Sheng-gen, LIU Xu, *et al.* Measurement system of projection lens based on CCD modulation transfer function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 260-263.
周杰, 邱胜根, 刘旭, 等. 应用 CCD 的投影物镜调制传递函数测量系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 260-263.

[4] LEVY E, PELES D, OPPER-LIPSON M, *et al.* Modulation transfer function of a lens measured with a random target method[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(4): 679-683.

[5] LETTINGTON A H, HONG Q H. Measurement of the discrete modulation transfer function[J]. *Journal of Modern Optics*, 1993, **40**(2): 203-212.

[6] DANIELS A, BOREMAN G D, DUCHARME A D, *et al.* Random transparency targets for modulation transfer function measurement in the visible and infrared regions[J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(3): 860-868.

[7] KUBOTA H, OHZU H. Method of measurement of response function by means of random chart[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1957, **47**(7): 666-667.

[8] MAROM E, MILGROM B, KONFORTI N. Two-dimensional modulation transfer function: a new perspective[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(35): 6749-6755.

[9] HAIM H, KONFORTI N, MAROM E. Optical imaging systems analyzed with a 2D template[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(14): 2739-2746.

[10] HAIM H, KONFORTI N, MAROM E. Performance of imaging systems analyzed with two-dimensional target[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(25): 5966-5972.

[11] FETTERLY K A, HANGIANDREOU N J, SCHUELER B A, *et al.* Measurement of the presampled two-dimensional modulation transfer function of digital imaging systems[J]. *Medical Physics*, 2002, **29**(5): 913-921.

[12] WELLS J R, DOBBINS III J T. Estimation of the two-dimensional presampled modulation transfer function of digital radiography devices using one-dimensional test objects[J]. *Medical Physics*, 2012, **39**(10): 6148-6160.

[13] YU Yi. The research of Zygo interferometer and its application[D]. Tianjin University, 2005.
于毅. Zygo 干涉仪及其应用的研究[D]. 天津大学, 2005.

[14] RAO Xue-jun, LING Ning, WANG Cheng, *et al.* Application of Hartmann-Shack sensor in aspheric process[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 491-494.
饶学军, 凌宁, 王成, 等. 哈特曼-夏克传感器在非球面加工中的应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 491-494.

[15] 苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 77-79.

[16] CHEN Li-xue. Transfer performance analysis for sampled image systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(11): 1547-1551.
陈立学. 采样成像系统的传递性能分析[J]. *光学学报*, 1995, **15**(11): 1547-1551.

[17] YANG Hua, JIAO Wen-chun, ZHU Yong-hong, *et al.* Modulation transfer function of CCD camera at nyquist frequency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 313-316.
杨桦, 焦文春, 朱永红, 等. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 313-316.

[18] FENG Zhi-wei, CHENG Hao-bo, SONG Qian, *et al.* Modulation transfer function measurement of electron multiplying CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9):

- 1710-1716.
- 冯志伟,程灏波,宋谦,等. 电子倍增电荷耦合器件的调制传递函数测量[J]. 光学学报, 2008, **28**(9):1710-1716.
- [19] JIANG Xiao-guo, TAN Zhao, LI Ze-ren, *et al.* The study on the factors effecting CCD modulated transfer function[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 830-833.
- 江孝国,谭肇,李泽仁,等. 影响 CCD 调制传递函数因素研究[J]. 光子学报, 2003, **32**(7):830-833.
- [20] LU Jin, CHEN Wei-min, CEN Jun-bo. Measuring modulation transfer function with mask for imaging sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1565-1568.
- 鲁进,陈伟民,岑军波. 模板法测量图像传感器调制传递函数方法研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(10):1565-1568.
- [21] WANG Li, TIAN Wei-jian, WANG Yao-xiang, *et al.* Measurement method for modulation transfer function of fiber optic taper coupled with CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 613-615.
- 汪丽,田维坚,王耀祥,等. 光锥与 CCD 耦合器件调制传递函数的测试方法[J]. 光子学报, 2005, **34**(4):613-615.
- [22] HUI Mei, NIU Han-ben. A method of wavefront data fitting using zernike polynomials[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(12): 1113-1116.
- 惠梅,牛憨笨. 运用泽尼克多项式进行物面波前数据拟合[J]. 光子学报, 1999, **28**(12):1113-1116.
- [23] 关治,陆金甫. 数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2011, 232-237.
- [24] BACKMAN S, MAKYNEN A, KOLEHMAINEN T, *et al.* Random target method for fast MTF inspection[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(12): 2610-2615.