

文章编号: 0253-2239(2005)07-918-5

# 线性离散成像系统调制传递函数的随机条纹测试法\*

张旭升 沙定国

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

**摘要:** 离散光电成像系统因其不再具有平移不变特性, 它的调制传递函数测试具有相当的复杂性和不稳定性。为提高光学系统调制传递函数测试的灵活性和可重复性, 在基于统计光学和随机信号相关性理论的基础上, 分析了离散型空间随机信号经线性光学系统成像后的物像相关性, 提出了应用随机条纹靶来测定调制传递函数的方法, 并给出了计算数据结果。该方法从统计意义上考虑了离散采样成像器件的采样场景相位的影响, 大大提高了现场测试的灵活性和自动化程度, 具有很好的应用前景。此方法同样适用于一般光学成像系统的调制传递函数测量。

**关键词:** 光学测量; 调制传递函数; 离散型空间随机信号; 相关函数; 随机条纹靶

中图分类号: TH741.4 文献标识码: A

## Method for Modulation Transfer Function Measurement of Linear Sampled Imaging System Using Random Bar Targets

Zhang Xusheng Sha Dingguo

(Department of Optical Engineering, School of Information Science and Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100081)

**Abstract:** The measurement of modulation transfer function (MTF) of the sampled imaging opto-electronic system is rather complex and irrepeatable for their shift-variant characteristics. Based on the theory of statistical optics and stochastic process, the correlation relationship of spatially discrete random signal pattern and its corresponding image through a linear optical imaging system are analyzed. A method using random bar pattern for modulation transfer function measurement is proposed, and the emulational experimental result is demonstrated. The random bar pattern test method reduces the effect of sample-scene phasing of sampled imaging device in statistical sense. This method is also adapted to the MTF measurement of commonly shift-invariant optical system and is expected to greatly improve the flexibilities and automation degree of MTF testing.

**Key words:** optical measurement; modulation transfer function (MTF); spatially discrete random signal; correlation function; random bar target

### 1 引 言

复值光学传递函数(OTF)是评价光学成像系统性能的较为完善的一种量化技术指标, 它的模值即调制传递函数(MTF)则是评价光学成像系统分辨细节能力的一个重要测度, 在国际上已被广泛接受和使用。调制传递函数的测量方法多种多样, 已经实用化了的和文献论述的方法有: 正弦光栅扫描法<sup>[1]</sup>、狭缝扫描法<sup>[1]</sup>、刀口扫描法<sup>[2]</sup>、干涉法<sup>[3]</sup>、矩形光栅法<sup>[4]</sup>、激光散斑法<sup>[5~7]</sup>等。这些方法的典型例子是基于机械扫描原理研制的传递函数测试仪,

国内外的典型产品有英国伊灵·贝克(Ealing&Beck)公司的EROS系列传递函数测量装置、国产的GCH-1型高精度多用途传递函数测量仪等。这类方法的测量原理和设备比较复杂、操作困难、对测试人员的专业技术水平要求较高, 而且重复性和使用灵活性也不是非常理想。

传统的光学传递函数概念和测试方法都是建立在光学系统是线性平移不变性(等晕)假定的基础上的。但现在的光电系统往往包含了离散采样成像器件, 如 CCD 等, 这类离散采样成像系统将不再具有

\* 国家部委基金(03C0900B002)资助课题。

作者简介: 张旭升(1978~), 男, 浙江浦江人, 北京理工大学光电工程系测试计量技术及仪器专业博士研究生, 主要从事光学测量与像质鉴定研究。E-mail: zhangxs@bit.edu.cn

收稿日期: 2004-06-04; 收到修改稿日期: 2004-11-19

平移不变特性,导致出现采样场景相位效应<sup>[9]</sup>和混频现象。评价这类离散采样成像光电系统,将不是通常意义上的光学传递函数,而应该是建立在统计意义上的平均光学传递函数<sup>[9]</sup>。为得到平均调制传递函数,矩形光栅法和刀口扫描法等测量方法要求非常准确地微量平移(通常是在亚像元级)测试目标或采样器件,使采样器件像元和入射图像间形成精确对准。这对测试装置的制造精度提出非常严格的要求,由于有精密机械扫描机构使用起来也不是特别方便快捷。人们一直在努力寻找一种灵活简便、又便于实现计算机软件操作控制的实用新技术。近年来,美国 Optikos 公司开发成熟的视频图像分析法<sup>[10]</sup>及测试设备,在国际上获得了推广和应用。它摒弃了机械扫描方式,被认为是一种测量快捷、操作简便的实用新技术。但该方法也是建立在平移不变性假设基础上的,不能用于测试离散成像器件的调制传递函数。

本文根据随机过程<sup>[9]</sup>原理,考察了离散空间信号通过线性成像系统后的物像相关性与成像系统的空间频率响应函数之间的关系。指出可以通过构造若干组随机条纹测试靶,结合新型高分辨率液晶显示器件和计算机程序控制,来快速简便地测量光学系统或离散采样成像系统调制传递函数。为此,我们开发了高分辨率液晶图形发生器及其配套软件,并申请了实

用新型技术专利(中国专利申请号:200420112732.1)。该方法的优点是:能非常容易地得到大量随机条纹测试图或其他类型的测试图,便于进行统计意义上的测试,具有很高的灵活性和可操作性;具有平移不变特性;测试过程简单对人员的专业技术水平要求不高,利于实现计算机自动化测试。

## 2 基本原理

设有一个离散空间随机信号  $f(n)$ ,典型地它可以是一组由液晶图形发生器生成的灰度条纹图形,或别的介质上的测试图形,其中  $n$  是离散图样点。图样点间距一般就是液晶等显示器件的像元间距。它经过线性平移不变性光学系统,设其空间域响应函数为  $h(n)$ ,横向放大因子规一化为 1,成像为  $g(n)$ ,成像关系为

$$g(n) = f(n) * h(n) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} f(i)h(n-i), \quad (1)$$

式中的  $*$  表示空间卷积。根据卷积的交换性,上式还可以表示为

$$g(n) = h(n) * f(n) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} h(i)f(n-i), \quad (2)$$

很显然成像系统物像之间会存在一定的相关性,考虑物像的互相关函数,并设空间随机信号为各态遍历(ergodic)<sup>[11]</sup>的平稳随机信号,有

$$r_{fg}(m) = E[f(n)g(n+m)] = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^{+M} [f(n)g(n+m)], \quad -M \leq m \leq M, \quad (3)$$

式中为集总意义上的平均(ensemble average),而  $\lim_{M \rightarrow \infty} \{ \cdot \}$  为空间意义上的平均。考虑到实际信号总是有限长度的,因此可省略上式中的求极限,作为相关函数的估计。于是有

$$\begin{aligned} r_{fg}(m) &= \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^{+M} [f(n)g(n+m)] = \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^{+M} f(n) \sum_{i=-M}^{+M} [h(i)f(n+m-i)] = \\ &= \frac{1}{2M+1} \sum_{i=-M}^{+M} h(i) \sum_{n=-M}^{+M} [f(n)f(n+m-i)] = \sum_{i=-M}^{+M} [h(i)r_f(m-i)] = r_f(m) * h(m), \end{aligned} \quad (4)$$

式中的  $r_f(m)$  为  $f(n)$  的自相关函数的估计,在推导中用到了(2)式。通过对上式等号两边求傅里叶变换,得到

$$P_{fg}(\mu) = P_f(\mu)H(\mu), \quad (5)$$

式中的  $P_{fg}(\mu)$  为物像互功率谱估计, $P_f(\mu)$  为物的自功率谱估计, $H(\mu)$  为光学成像系统的频域响应函数,也就是光学传递函数。如果我们能设法得到  $P_{fg}(\mu)$  和  $P_f(\mu)$ ,就能计算得出系统的光学传递函数。

同样,对于图像  $g(n)$  的自相关函数  $r_g(n)$ ,也可以在空间平均的意义上简化对集总平均的计算:

$$\begin{aligned} r_g(m) &= \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^{+M} [g(n)g(n+m)] = \\ &= \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^{+M} \left\{ \sum_{i=-M}^{+M} [h(i)f(n-i)] \sum_{j=-M}^{+M} [h(j)f(n+m-j)] \right\} = \\ &= \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M+1} \sum_{i=-M}^{+M} h(i) \sum_{j=-M}^{+M} h(j) \left\{ \sum_{n=-M}^{+M} f(n-i)f(n+m-j) \right\} = \end{aligned}$$

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{i=-M}^{+M} h(i) \sum_{j=-M}^{+M} [h(j)r_f(m+i-j)] = \lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{i=-M}^{+M} [h(i)c(m+i)] = c(m) * h(-m), \quad (6)$$

(6)式在推导中用到了(2)式,并且上式中

$$c(m+i) = r_f(m+i) * h(m+i),$$

也就有  $c(m) = r_f(m) * h(m)$ ,

因此可以得到

$$r_g(m) = r_f(m) * h(m) * h(-m), \quad (7)$$

等式两边求傅里叶变换,得到频域下的等式:

$$P_g(\mu) = P_f(\mu) |H(\mu)|^2, \quad (8)$$

式中的  $P_g(\mu)$  为像自功率谱估计,  $P_f(\mu)$  为物的自功率谱估计,  $H(\mu)$  为光学成像系统的频域响应函数。

(5) 式和(8) 式就是实验分析和测试的理论基础,它要求对光电成像系统的测试目标物及其形成的像进行功率谱分析和估计,由此来得到成像系统的调制传递函数。

### 3 计算结果及分析

利用计算机随机数发生器产生若干组一定长度的伪随机数,通过编程来生成若干组随机条纹测试

靶。这些随机条纹靶能用于测试一个方向(比如子午或弧矢方向)的调制传递函数,并且通过对若干组测试条纹的测试,来获取稳定的平均调制传递函数。这里,假定系统的点扩展函数近似为高斯分布函数:

$$h(x,y) = \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (9)$$

式中方差因子  $\sigma$  为常数,在光学成像系统中表征能量扩展程度。上述点扩展函数的傅里叶变换很容易计算,因此可以容易地得到理论计算出的调制传递函数曲线,便于做比对分析。

图 1 给出了任意一幅随机条纹测试图及经高斯滤波后的图像,图 1(b)是原始随机条纹图与点扩展函数的卷积结果。可以利用周期图法<sup>[11]</sup> 直接对原始离散空间随机数据和经点扩散函数卷积后的图像数据进行功率谱估计,或根据对互(或自)相关函数的估计间接进行功率谱估计。首先使用(5)式做数据分析,计算得到图 2 所示的处理结果。

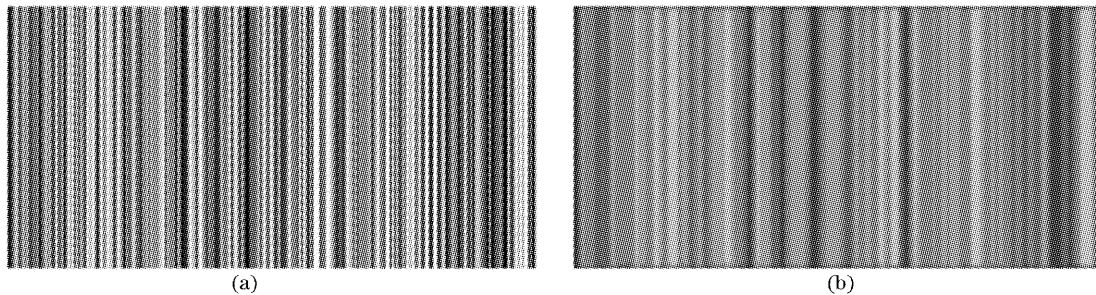


图 1 (a) 灰度随机条纹靶,(b)随机条纹靶的像

Fig. 1 (a) Random bar target in gray scale, (b) image of the random bar target

图 2(a)只进行了一组随机条纹的仿真计算,并对

获得的原始调制传递函数数据进行了最小二乘 7 次

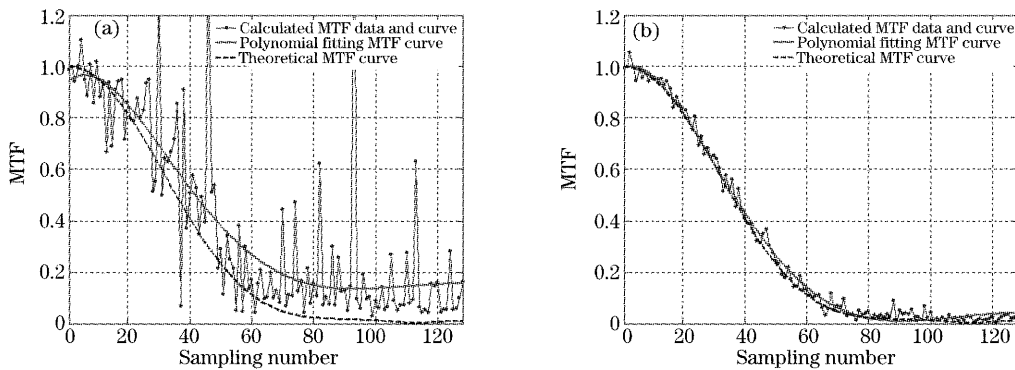


图 2 (a)方程(5)计算的单次实验调制传递函数数据与多项式拟合曲线,

(b)5 次随机条纹测试实验的平均调制传递函数与多项式拟合曲线

Fig. 2 (a) Calculated MTF data got from one test by Eq. (5) and the polynomial fitting curve, (b) calculated mean MTF data and the polynomial fitting curve which are got from and five random bars' tests by Eq. (5)

正交多项式拟合。可以看出原始调制传递函数计算数据的随机波动性比较大,各次实验间拟合曲线有不小的波动,但拟合曲线趋势基本和理论计算曲线一致。图 2(b)图则是根据对五组随机条纹进行计算得到的集总平均调制传递函数数据及拟合曲线,从图中可以看出,调制传递函数数据的随机性已经大大降低,拟合调制传递函数曲线和理论预测曲线很吻合。

图 3 是采用(8)式的计算数据点及曲线,也进行了多项式拟合给出了拟合曲线和理论计算曲线。同

样图 3(a)仅对一组随机条纹进行了分析,可以看出调制传递函数拟合曲线基本逼近理论曲线,但它的调制传递函数数据还有一定的随机性,各次实验间拟合曲线有一定的波动,尤其是在低频点附近波动较大。图 3(b)则是对五组随机条纹测试图进行计算得到的集总平均调制传递函数数据及拟合曲线,也可以看到调制传递函数数据的随机性大大降低,拟合其曲线和理论曲线非常吻合。

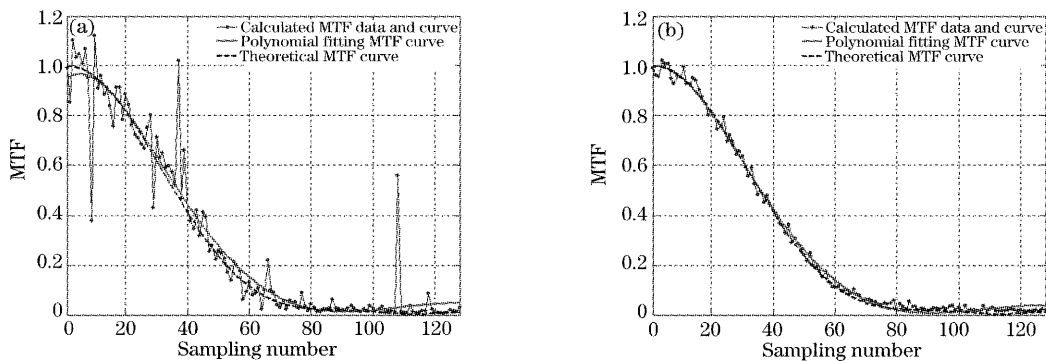


图 3 (a) 由方程(8)计算的单次实验调制传递函数数据, (b) 五次随机条纹测试实验的平均调制传递函数数据和多项式拟合曲线

Fig. 3 (a) Calculated MTF data got from one test by Eq. (8) and the polynomial fitting curves, (b) Calculated mean MTF data and the polynomial fitting curve which we get from five random bars' tests by Eq. (8)

从上面的计算结果看到,集总平均是必要的,对调制传递函数数据的稳定性也是非常有效的。需要说明的是上述仿真计算曲线图中横坐标单位均使用了采样数据点数,实际测试中需要根据光电成像系统配置(液晶显示器像元、CCD 像元有效尺寸,光学系统放大倍率等)情况进行频率换算以确定数据单位。此外,由于实际测试情况的复杂性以及存在较

多的误差源,预期效果比理论仿真结果要差。

按上述方法测试了一个实际系统,测试光路设置如下: $f=3500$  mm 平行光管,被测标准望远系统视放大倍率为 9 倍,像分析器 CCD 镜头为 0 视度  $f=200$  mm, PULNIX CCD 像元大小是  $6.7 \mu\text{m} \times 6.7 \mu\text{m}$ , SONY LCX029 液晶像元尺寸  $17.86 \mu\text{m} \times 17.86 \mu\text{m}$ 。图 4 给出了一组随机测试条纹及其图

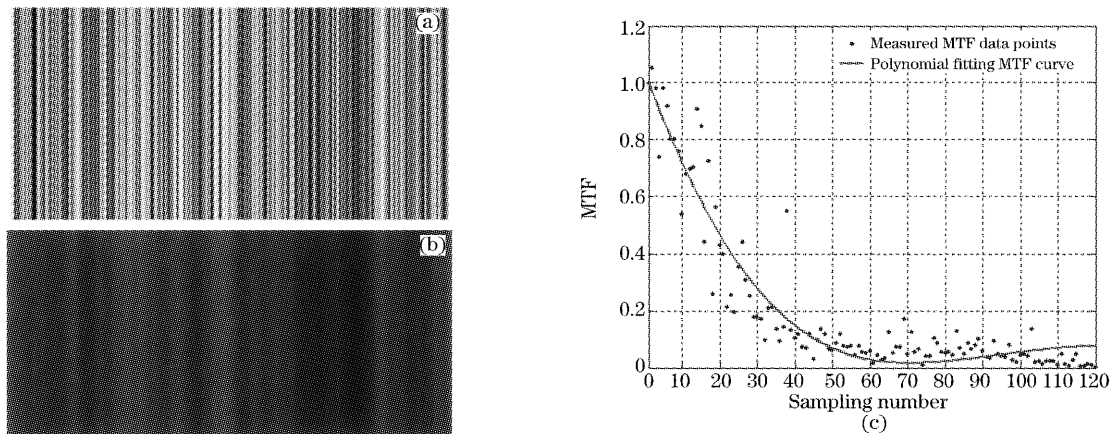


图 4 (a) 灰度随机条纹靶(256 线), (b) 随机条纹靶的像, (c) 从五次随机条纹测试实验中测量出来的调制传递函数数据和其拟合曲线

Fig. 4 (a) Random bar target in gray scale (256 lines), (b) image of random bar target, (c) measured MTF data and its fitting curve obtained from five random bar tests

像,其中随机条纹共 256 线,它对应的图像则有 352 线。因系统放大倍率和像元大小的原因,物方数据和像方数据点数并不相同,为此需要先根据成像物理模型进行数据插值归一化。通过图像分析处理得到图 4(c)所示测量结果。该测量结果是整体系统的传递函数特性曲线,因目前缺少该整体系统的传递函数准确值,在比对该结果的精度方面存在困难,有待继续深入进行实验比对研究。但直观上图中的曲线基本能反映出系统传递函数形式。

## 4 结 论

根据随机信号通过线性系统前后的相关性,导出了计算系统频谱响应函数的计算式。该计算式已经在电子信号与通信系统中广泛使用,鉴于光学系统也是一个线性低通滤波系统,该方法有望在光学系统的频谱响应函数测试中获得推广应用。

物像相关测试法采用离散空间随机信号作为测试目标,在统计平均意义上分析光电系统或光学元件的调制传递函数,避免了矩形光栅法、刀口法等传统方法为获取最大、最小和平均调制传递函数曲线所需要的精密扫描和精确对准操作,简化了测试过程。可以认为该方法对离散采样成像系统的采样场景相位(Sample-scene phase)效应不灵敏,采样器件产生的非平移不变性现象可以不加考虑。

各种随机测试靶标可以由计算机程序控制生成并在液晶显示器上实时显示,切换不同的测试图形或者进行多次重复测试快速灵活,适合计算机软件的编制。

如果选择适当的随机输入信号,使其具有白噪声谱特性,即它的功率谱在光学系统有效频率范围内始终为一常数,计算过程可以更加简化。

物像相关测试法使用液晶显示器等面光源,既适宜进行轴上白光调制传递函数测试,也适合轴外调制传递函数测试,且轴上轴外调制传递函数测试

可望通过一次实验完成,无需再调整光路结构。

由于在对物像相关函数及功率谱估计的过程中,需要它们的数据点数相同,而实际光学成像系统存在一定的放大率及 LCD、CCD 等面阵器件像元大小不一致,需要进行必要的归一化和变换,这是实用化过程中需要进一步研究的重点。

## 参 考 文 献

- 1 Su Datu, Shen Hailong, Chen Jinbang *et al.*. *Optical Testing & Image Quality Evaluation* [M]. Beijing: Press of Beijing Institute of Technology, 1988 (in Chinese)  
苏大图,沈海龙,陈进榜等. 光学测量与像质鉴定[M]. 北京:北京工业学院出版社,1988
- 2 Hon-Sun Wong. Effect of knife-edge skew on modulation transfer function measurements of charge-coupled device imagers employing a scanning knife edge[J]. *Opt. Engng.*, 1991, **30**(9): 1394~1398
- 3 John E. Greivenkamp, Andrew E. Lowman. Modulation transfer function measurement of sparse-array sensors using a self-calibrating fringe pattern[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(22): 5029~5036
- 4 David N. Sitter, Jr., James S. Goddard *et al.*. Method for the measurement of the modulation transfer function of sampled imaging systems from bar-target patterns [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(4): 746~751
- 5 G. Boreman, E. L. Derenlak. Method for measuring modulation transfer function of charge coupled devices using laser speckle [J]. *Opt. Engng.*, 1986, **25**(1): 148~150
- 6 William Astar. New power-efficient optical filter for detector array modulation transfer function measurement by laser speckle [J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(9): 2761~2764
- 7 Zhou Jie, Qiu Shenggen, Liu Xu *et al.*. Measurement system of projection lens based on CCD modulation transfer function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 260~263 (in Chinese)  
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
- 8 Stephen K. Park, Robert Schowengerdt, Mary-Anne Kaczynski. Modulation-transfer-function analysis for sampled image systems [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(15): 2572~2582
- 9 Joseph W. Goodman. *Statistical Optics* [M]. John Wiley & Sons, Inc. 1985
- 10 Optikos Corporation. *Optical Testing System Operation Manual* [M]. Version 5.0. Cambridge, Optikos Corporation, 2002
- 11 Hu Guangshu. *Digital Signal Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997 (in Chinese)  
胡广书. 数字信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1997