

# 矩形靶标测试 CCD 相机调制传递函数的研究

聂 品 田海英 董 斌 张景国 张 健

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要** 利用矩形靶标测量 CCD 相机的整机调制传递函数时, 由于靶标与 CCD 像元之间在初始角度误差与初始位置误差, 实验测得的调制传递函数小于 CCD 相机实际调制传递函数。根据调制传递函数的定义, 模拟 CCD 对具有初始角度误差与初始位置误差的矩形靶标成像, 推导出了 CCD 像元的亮度分布公式, 从而给出了调制函数与初始角度误差和初始位置误差的关系, 并分别对具有初始角度差、初始位置差的情况进行分析。最后利用像元间的亮度差推导出计算初始角度误差的理论公式并进行了仿真验证。

**关键词** 测量; 初始误差; 矩形靶标; 调制传递函数测试; CCD 相机

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.1204002

## Research of Modulation Transfer Function Measurement of CCD Camera with Rectangle Target

Nie Pin Tian Haiying Dong Bin Zhang Jingguo Zhang Jian

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** When measuring the modulation transfer function (MTF) of CCD camera with rectangle target, the test value of MTF is less than the actual value due to the initial position error and the initial angle error between the target and pixels of CCD. With the definition of MTF, the luminance distribution of CCD pixels is deduced and the relationship between MTF and the initial errors is given. The results with initial position and angle errors are analyzed. The formula of initial angle error is deduced by using the luminance of pixels and the result is verified by simulation.

**Key words** measurement; initial error; rectangle target; modulation transfer function measurement; CCD camera

**OCIS codes** 120.4630; 120.4800; 110.4850; 040.1520

## 1 引 言

调制传递函数(MTF)能够全面、科学地评价光学成像系统的性能, 是 CCD 相机设计与验收的重要指标之一<sup>[1]</sup>。调制传递函数测试要求被测系统满足线性空间不变性, 而 CCD 作为离散采样的成像器件, 不是完全空间不变的<sup>[2]</sup>, 所以输入信号的相位(位置误差)对系统调制传递函数的测量会产生影响<sup>[3~5]</sup>。Campana<sup>[6]</sup>指出矩形条纹靶与 CCD 的相对位置改变时, 调制传递函数会出现波动; Feltz 等<sup>[3]</sup>给出了采用正弦靶标时线阵 CCD 与相位有关的调制传递函数表达式; 宋敏等<sup>[4]</sup>用实验验证了 Feltz 的理论计算。

CCD 像元的大小决定了系统的空间截止频率, 即奈奎斯特频率, 而在奈奎斯特频率处靶标与 CCD 像元之间的相对位置对测量结果的影响最大<sup>[7,8]</sup>。因此, 在实际调制传递函数测试过程中, 需要尽量减小靶标与 CCD 像元之间的位置配准误差, 如文献[9,10]中采用将  $n$  组三线靶标按等差排列的粗分法, 文献[11]采用分步移动靶标至少 1 pixel 的步进法, 文献[12]采用粗分细分相结合的方法, 这些方法都会存在一定的测试误差, 且上述文献均未对靶标与 CCD 像元之间的初始角度误差进行分析。

本文对采用矩形靶标测量 CCD 相机整机奈奎

**收稿日期:** 2012-05-18; **收到修改稿日期:** 2012-07-05

**作者简介:** 聂 品(1981—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事航空成像与测量技术等方面的研究。

E-mail: np0618@126.com

斯特频率处的调制传递函数时,靶标与 CCD 像元之间的初始位置误差以及初始角度误差对测量结果的影响进行相应的理论分析,并通过分析推导出了初始角度误差的理论计算公式。

## 2 CCD 相机调制传递函数测试原理

CCD 相机调制传递函数测试多采用高对比度靶标法,即利用 CCD 相机对靶标成像,通过输出图像的调制度与输入靶标的调制度之比即可求出 CCD 相机的调制传递函数<sup>[13]</sup>。理论上应采用正弦靶标测量系统的调制传递函数,但由于正弦靶标制作困难,因此工程实际中一般采用矩形靶标。调制传递函数测试方法如图 1 所示。

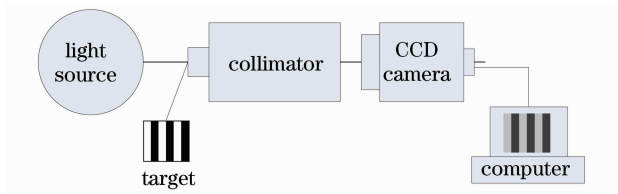


图 1 CCD 相机调制传递函数测试示意图

Fig. 1 Principle of modulation transfer function measurement of CCD camera

将矩形靶标置于平行光管的焦面处,调整相机镜头光轴与平行光管的光轴平行。靶标经平行光管、相机镜头成像后被相机 CCD 接收成靶标像,则 CCD 相机整机的调制传递函数为<sup>[14]</sup>

$$f_{MT} = \frac{\pi}{4} \times \frac{M_o}{M_i}, \quad (1)$$

式中  $M_o$ 、 $M_i$  分别为输出图像(靶标像)、输入目标(靶标)的调制度。

输出调制度  $M_o$  定义为

$$M_o = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2)$$

式中  $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$  分别表示图像的最大、最小亮度。

一般对于高对比度矩形靶标,  $M_i = 1$ , 则

$$f_{MT} = \frac{\pi}{4} \times M_o = \frac{\pi}{4} \times \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (3)$$

由(3)式可知,系统的调制传递函数只与靶标像的亮度有关,因此在后续分析中,主要研究当靶标与

CCD 像元之间存在初始位置误差以及初始角度误差时,CCD 像元对靶标成像后亮度的分布情况以及调制度的计算。

## 3 理论分析

在利用上述方法进行调制传递函数的测试时,为使测试结果更接近真实值,对靶标与 CCD 像元之间的相对位置有两个要求:首先是尽量使两者无初始角度误差,即靶标条纹方向与 CCD 像元列方向平行;其次是使两者之间无初始位置误差,即靶标亮暗条纹与 CCD 像元列无相位差。

### 3.1 调制度分析

靶标像在 CCD 像元上的照度分布如图 2 所示,图中黑框代表 CCD 像元,取 CCD 为 5 行 6 列,像元尺寸为  $a \times a$ ,靶标图像包含三条亮条纹  $S_1$ ,三条暗条纹  $S_2$ ,条纹宽度为  $a$ ,靶标像与 CCD 像元之间存在初始角度误差  $\theta$ 。

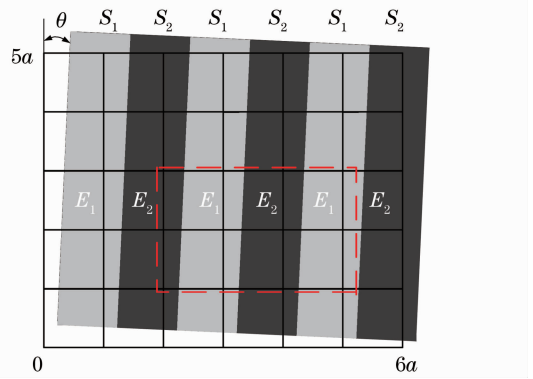


图 2 靶标像照度分布示意图

Fig. 2 Luminance distribution of rectangle target with initial error

靶标像的照度分布为

$$E(s) = \begin{cases} E_1, & s \in S_1 \\ E_2, & s \in S_2 \end{cases} \quad (4)$$

选取图 2 中虚线所示像元进行分析,如图 3 所示,  $\epsilon_0$  为第  $(i, j)$  个像元与靶标之间的初始位置误差。

像元亮度等于照度与像元面积的乘积,因此第  $(i, j)$  个像元输出的亮度值为

$$I_{(i,j)} = \int_0^{a\epsilon_0} \int_0^a E_2 dx dy + \int_0^{a\epsilon_0 + y \tan \theta} \int_{\epsilon_0}^a E_2 dx dy + \int_0^{a\epsilon_0 + y \tan \theta} \int_{\epsilon_0}^a E_1 dx dy + \int_{0\epsilon_0 + a \tan \theta}^a \int_0^a E_1 dx dy = \left(a^2 - a\epsilon_0 - \frac{1}{2}a^2 \tan \theta\right)E_1 + \left(a\epsilon_0 + \frac{1}{2}a^2 \tan \theta\right)E_2, \quad (5)$$

第  $(i, j+1)$  个像元输出的亮度值为

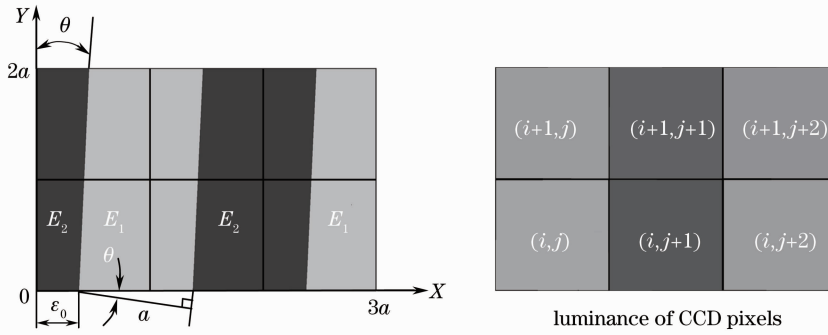


图 3 CCD 像元亮度计算模型

Fig. 3 Calculation model of CCD pixels luminance

$$\begin{aligned}
 I_{(i,j+1)} = & \int_0^{a/\cos\theta+\epsilon_0} \int_a^{a/\cos\theta+\epsilon_0+y\tan\theta} E_1 dx dy + \int_0^{a/\cos\theta+\epsilon_0} \int_{a/\cos\theta+\epsilon_0}^{a/\cos\theta+\epsilon_0+y\tan\theta} E_2 dx dy + \int_0^a \int_{0}^{2a} E_2 dx dy = \\
 & \left( \frac{a^2}{\cos\theta} - a^2 + a\epsilon_0 + \frac{1}{2}a^2 \tan\theta \right) E_1 + \left( 2a^2 - \frac{a^2}{\cos\theta} - a\epsilon_0 - \frac{1}{2}a^2 \tan\theta \right) E_2. \quad (6)
 \end{aligned}$$

由(3)式、(5)式与(6)式可得相邻两像元的调制度  $M(\epsilon_0, \theta)$ , 即

$$M(\epsilon_0, \theta) = \cos\theta \left( 2 - \frac{1}{\cos\theta} - \frac{2\epsilon_0}{a} - \tan\theta \right) \frac{E_1 - E_2}{E_1 + (2\cos\theta - 1)E_2}. \quad (7)$$

若无初始角度误差及初始位置误差时, 得到理论调制度

$$M_0 = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2}. \quad (8)$$

显然, 初始位置误差与初始角度误差的存在将影响最后的测试结果。

1) 当  $\epsilon_0 = 0, \theta \neq 0$  时

$$\begin{aligned}
 M(\theta) = & \cos\theta \left( 2 - \frac{1}{\cos\theta} - \tan\theta \right) \times \\
 & \frac{E_1 - E_2}{E_1 + (2\cos\theta - 1)E_2}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

实际测试结果与理论输出调制度  $M_0$  之间无明确的函数关系, 并且整个靶标像中亮暗条纹相邻两个像元的调制度不等, 严重影响测试结果的真实性。此时, 除第  $(i, j)$  个像元外, 其余像元的初始位置误差都

不为 0, 并且所有像元的初始位置误差都不相等。

2) 当  $\theta = 0, \epsilon_0 \neq 0$  时

$$M(\epsilon_0) = \left( 1 - \frac{2\epsilon_0}{a} \right) M_0. \quad (10)$$

调制传递函数与初始位置误差成线性关系, 靶标像亮条纹的各个像元亮度是相等的, 暗条纹的各个像元亮度也是相等的。

因此, 在实际测试过程中, 消除初始角度误差是不可或缺的工作内容, 然后尽量减小初始位置误差, 使测试结果更真实、可靠。

### 3.2 初始角度误差

为了求解初始角度误差, 分别计算图 3 中在列、行方向与第  $(i, j)$  个亮像元相邻的第  $(i+1, j), (i, j+2)$  个亮像元的亮度值,

$$\begin{aligned}
 I_{(i+1,j)} = & \int_0^{a\epsilon_0+a\tan\theta} \int_0^{a\epsilon_0+y\tan\theta} E_2 dx dy + \int_{0\epsilon_0+a\tan\theta}^{a\epsilon_0+y\tan\theta} \int_{0\epsilon_0+a\tan\theta}^{a\epsilon_0+y\tan\theta} E_2 dx dy + \int_{0\epsilon_0+a\tan\theta}^{a\epsilon_0+y\tan\theta} \int_{0\epsilon_0+2a\tan\theta}^a E_1 dx dy + \int_{0\epsilon_0+2a\tan\theta}^a \int_{0\epsilon_0+2a\tan\theta}^a E_1 dx dy = \\
 & \left( a^2 - a\epsilon_0 - \frac{3}{2}a^2 \tan\theta \right) E_1 + \left( a\epsilon_0 + \frac{3}{2}a^2 \tan\theta \right) E_2, \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{(i,j+2)} = & \int_0^{2a/\cos\theta+\epsilon_0} \int_{2a}^{2a/\cos\theta+\epsilon_0+y\tan\theta} E_2 dx dy + \int_0^{2a/\cos\theta+\epsilon_0} \int_{2a/\cos\theta+\epsilon_0}^{2a/\cos\theta+\epsilon_0+y\tan\theta} E_2 dx dy + \int_0^{2a/\cos\theta+\epsilon_0} \int_{2a/\cos\theta+\epsilon_0}^{2a/\cos\theta+\epsilon_0+y\tan\theta} E_1 dx dy + \int_{0\ 2a/\cos\theta+\epsilon_0}^a \int_{0\ 2a/\cos\theta+\epsilon_0+a\tan\theta}^{3a} E_1 dx dy = \\
 & \left( 3a^2 - \frac{2a^2}{\cos\theta} - a\epsilon_0 - \frac{1}{2}a^2 \tan\theta \right) E_1 + \left( \frac{2a^2}{\cos\theta} - 2a^2 + a\epsilon_0 + \frac{1}{2}a^2 \tan\theta \right) E_2. \quad (12)
 \end{aligned}$$

(5)式分别减去(11)式与(12)式可得

$$\Delta I_{(\Delta i, j)} = a^2 \tan \theta (E_1 - E_2), \quad (13)$$

$$\Delta I_{(i, \Delta j)} = 2a^2 \left( \frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta} \right) (E_1 - E_2). \quad (14)$$

可知,两者都是初始角度误差  $\theta$  的函数。当  $\theta$  确定后,在列方向上,相邻像元亮度差为常值;在行方向上,奇数像元间、偶数像元间的亮度差也为常值。

取  $C = \frac{\Delta I_{(\Delta i, j)}}{\Delta I_{(i, \Delta j)}}$ , 由(13)式与(14)式可得

$$C = \frac{\sin \theta}{2(1 - \cos \theta)}, \quad (15)$$

$$\theta = \arccos \left( \frac{4C^2 - 1}{4C^2 + 1} \right). \quad (16)$$

由以上分析可知,在像元亮度差为常值的靶标像区域,取任意一个像元测得其亮度值,并测得在列

方向与其相邻的像元亮度值,以及行方向与其间隔的像元的亮度值,利用(16)式即可确定靶标与 CCD 像元之间的初始角度误差。

在调整靶标方位时,利用上述方法确定靶标与 CCD 像元之间的初始角度误差,并进行相应的调整,可减少调整工作量,提高测试效率。

## 4 仿真实验

利用 Matlab 软件对上述推导结果进行验证,输入靶标图像为四组亮暗条纹组,亮暗条纹照度分别为  $E_1=0.234, E_2=0.766$ ,如图 4(a)所示。CCD 像面阵列列为  $8 \times 8$ ,仿真结果如图 4(b)、表 1 所示。

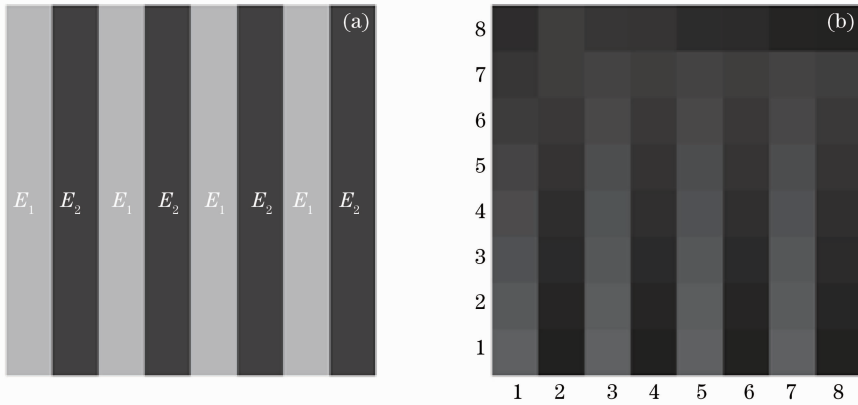


图 4 仿真图像。(a)靶标图像;(b)  $\theta=4^\circ$ 时 CCD 像元阵列照度

Fig. 4 Images of simulation, (a) Image of target; (b) luminance of CCD pixels when  $\theta=4^\circ$

表 1 仿真结果

Table 1 Results of simulation

$\theta$ given / ( $^\circ$ )	$I(i, j)$	$I(i+1, j)$	$I(i, j+2)$	$\theta$ simulation / ( $^\circ$ )	Percent error / %
4	0.3537	0.3351	0.3524	3.970	-0.75
4.3	0.3514	0.3314	0.3499	4.289	-0.26
6	0.3383	0.3104	0.3354	5.957	-0.72
6.6	0.3344	0.3037	0.3309	6.536	-0.97
7	0.3278	0.2951	0.3238	7.022	0.31
8.1	0.3236	0.2857	0.3182	8.150	0.62
9.7	0.3118	0.2664	0.3041	9.701	0.1
10	0.3101	0.2632	0.3019	10.00	0.3

由表 1 可知,仿真值与设置值的相对误差不大于 1%,产生误差的主要原因是仿真时将单个 CCD 像元离散化为  $256 \times 256$  个像素来模拟初始角度,与实际情况存在一定差别;此外,仿真计算时的舍入误差也在一定程度上影响仿真结果。因此,仿真分析验证了本文的初始角度误差计算公式的正确性。

## 5 结 论

初始位置误差与初始角度误差的存在使得 CCD 相机调制传递函数的测试值小于实际值,在测试过程中,应最大程度地消除初始角度误差,并尽量减小初始位置误差,使测试结果更接近理论值。

当靶标与 CCD 像元存在初始角度误差时,CCD

像元输出的靶标像亮度在行与列方向成等差关系, 该值为初始角度误差的函数。通过测量多个像元的亮度值, 可以利用公式计算出初始角度误差的大小, 从而为靶标方位调整提供参考。运用该方法还可以在 CCD 相机调制传递函数在轨测试中检验最后结果, 即通过比较相邻像元亮度值, 测算初始角度误差。

### 参 考 文 献

- 1 Chi Xuefen, Han Changyuan. Assessment of sampled imaging system based on information-theory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(3): 207~211  
迟学芬, 韩昌元. 基于信息理论的采样成像系统评价方法 [J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(3): 207~211
- 2 B. T. Teipen, D. L. MacFarlane. Liquid-crystal-display projector-based modulation transfer function measurements of charge-coupled-device video camera systems [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(4): 515~525
- 3 J. C. Feltz, M. A. Karim. Modulation transfer function of charge-coupled devices [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(5): 717~722
- 4 Song Min, Gui Xinkai, Zheng Yaru. Influence of phase match between input signal and CCD pixel on the MTF [J]. *Optical Technique*, 1999, **25**(3): 84~86  
宋 敏, 邹新凯, 郑亚茹. 输入信号与 CCD 像元位相匹配对调制传递函数的影响 [J]. *光学技术*, 1999, **25**(3): 84~86
- 5 Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong *et al.*. On-orbit MTF measurement of high resolution satellite optical camera using periodic targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0711001  
徐伟伟, 张黎明, 杨本永等. 基于周期靶标的高分辨率光学卫星相机在轨 MTF 检测方法 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0711001
- 6 S. B. Campana. Techniques for evaluating charge coupled imagers [J]. *Opt. Eng.*, 1977, **16**(3): 267~274
- 7 J. Laitinen, I. Moring. Method for evaluation of imaging in automated visual web inspection [J]. *Opt. Eng.*, 1997,

- 36**(8): 2184~2196
- 8 Wang Chunhong, Xiang Yang. MTF of line-array CCD on detection performance for hyperspectral imager [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(6): 1478~1481  
王春红, 向阳. 基于超光谱成像探测系统的线阵 CCD 的调制传递函数特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(6): 1478~1481
- 9 Zhang Xiaohui, Han Changyuan, Pan Yulong *et al.*. Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 687~701  
张晓辉, 韩昌元, 潘玉龙等. 传输型 CCD 相机综合像质评价方法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(4): 687~701
- 10 Hao Yuncai. Research on the registration for image quality test in laboratory of the linear array CCD camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1999, **20**(3): 27~30  
郝云彩. 线阵 CCD 相机试验室像质测试的配准方法研究 [J]. *航天返回与遥感*, 1999, **20**(3): 27~30
- 11 Qu Guozhi, Xiao Zuojiang. Measurement and analysis of modulation transfer function (MTF) based on CCD arial camera [J]. *J. Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, **33**(2): 18~21  
曲国志, 肖作江. CCD 航空相机调制传递函数测试与分析 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2010, **33**(2): 18~21
- 12 Fan Chao, Yi Hongwei, Li Yingcai. On the test target of MTF for the space camera [J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, **14**(4): 174~176  
樊 超, 易红伟, 李英才. 航天相机 MTF 测试靶标研究 [J]. *光电与控制*, 2007, **14**(4): 174~176
- 13 Yang Hua, Jiao Wenchun, Zhu Yonghong *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
- 14 J. S. Hu, M. Song, Y. Sun *et al.*. Measurement of modulation transfer function of charge-coupled devices using frequency variable sine grating patterns [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(7): 1200~1203

栏目编辑: 何卓铭