

CCD 相机调制传递函数的测试分析

赵曼¹ 姜博² 范秀英¹ 郭霏¹

(¹ 空军航空大学特种专业系, 吉林 长春 130022
² 吉林市技术监督信息开发中心, 吉林 吉林 132013)

摘要 调制传递函数(MTF)是评价 CCD 相机成像系统质量的重要参数,它能真实地反映相机拍摄时的空间频率与图像对比度的关系。CCD 相机的 MTF 测试中最关键的是靶标的选择,它决定了整个系统的测量精度和操作过程的复杂程度。理想的靶标函数是正弦函数,但制作光出射度随正弦波规律变化的分辨率板是非常困难的,因此利用明暗相间、相互平行的黑白条纹分辨率板来代替正弦波分辨率板,提出了测量 MTF 的方法。重点对 CCD 相机在奈奎斯特频率处的 MTF 测试结果进行了分析与评价。

关键词 测量; CCD 相机; 调制传递函数; 奈奎斯特频率

中图分类号 TM930.9 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP49.071201

Measurement and Analysis on the Modulation Transfer Function of CCD Camera

Zhao Man¹ Jiang Bo² Fan Xiuying¹ Guo Fei¹

(¹ Special Service Department, Aviation University of Air Force, Changchun, Jilin 130022, China)
² Jilin Technic Superintend Information Exploitation Center, Jilin, Jilin 132013, China)

Abstract Modulation transfer function (MTF) plays an important role in the CCD camera imaging system. It indicates the relation between spatial frequency and image contrast. In the MTF measurement experiment, the choosing of the test board is the key. The measurement accuracy of the system and the complexity of operating procedure strongly depend on it. Although the ideal function of the test board is sine function, it is difficult to make up the sine test board. In order to solve this problem, the testing method of MTF is introduced, in which the sine test board is replaced by the resolving power test target consisting of parallel dark and bright stripes alternately. The MTF of CCD camera is examined at the Nyquist frequency and the results are analyzed and evaluated in detail.

Key words measurement; CCD camera; modulation transfer function; Nyquist frequency

OCIS codes 120.1880; 040.1490; 040.1520

1 引言

调制传递函数(MTF)是客观评价光学系统成像质量的重要指标,能真实地反映成像系统空间频率的响应特性,对于照相系统而言,能真实地反映相机拍摄时的空间频率与图像对比度的关系,因此用 MTF 来评价 CCD 相机的成像质量就成为研究的热点^[1]。而在对 CCD 相机 MTF 的测试中,目前国内外普遍采用的方法是用准直仪将测试靶标成像到无限远处来模拟 CCD 相机的实际工作状态,再通过相机的镜头将其成像到 CCD 器件上,得到数值图像的调制度,用数值图像的调制度除以靶标调制度和准直仪的 MTF,从而得到 CCD 相机系统的 MTF^[2~5]。

测量 MTF 的关键是靶标的选择,因为靶标的选择决定了整个系统的测量精度和操作过程的复杂程度。一般来说正弦函数经过成像系统成像后,仍然为同频率的正弦函数,只是幅值和相位会发生一定的变化。因此在测量 MTF 时,正弦函数就是理想的靶标函数。但是制作光出射度随正弦波规律变化的分辨率板是非

收稿日期: 2012-02-16; **收到修改稿日期:** 2012-04-12; **网络出版日期:** 2012-05-22

作者简介: 赵曼(1982—),女,讲师,主要从事航空成像侦察设备方面的研究。E-mail: xman82@126.com

常困难的,所以在实际测试中一般用明暗相间、相互平行的黑白条纹来代替正弦波输出的信号^[6~9]。

本文对 MTF 的理论进行了分析并提出测试方法,重点对 CCD 相机在空间截止频率——奈奎斯特频率处的 MTF 测试结果进行了分析与评价。

2 实验原理

光学系统的 MTF 包括衍射受限系统的 $F_{MT-diff}$ 、光学设计的 F_{MT-des} 及光学加工装调引起的 F_{MT-fab} , 即

$$F_{MT-opt} = F_{MT-diff} \times F_{MT-des} \times F_{MT-fab}, \quad (1)$$

F_{MT-opt} 与相机镜头光学系统的组成有关,可利用 MTF 测量仪检测出该光学系统的 MTF,也可利用 Zemax 软件模拟镜头的光学系统,考虑各影响因素,计算出 MTF。

对于 CCD 器件而言,其采样 MTF、传输 MTF 和扩散 MTF 同时存在,因此 CCD 器件总的 MTF (F_{MT-CCD}) 为三者之积,即

$$F_{MT-CCD} = F_{MT-col} \times F_{MT-prop} \times F_{MT-spr}. \quad (2)$$

在 CCD 成像时,对于宽度为 d 的 CCD 像元,可以将其等效为一个宽度为 d 的矩形光电扫描狭缝。根据相应的卷积计算,这个矩形狭缝函数的傅里叶变换是一个 sinc 函数。由于在分析成像系统的 MTF 时不考虑输出信号的相位问题,系统的 MTF 总为正值,因此 CCD 的 MTF 为 $F_{MT-CCD} = |\text{sinc}(\pi Nd)|$, 式中 N 为采样频率。

当 CCD 以像元尺寸 d 为周期进行空间采样时,采样频率 $N = 1/d$ 。根据采样定理,采样频率决定了 CCD 成像时的空间截止频率 N_y , 即 $N_y = 1/2d$ 。在空间截止频率 N_y 处,有 $F_{MT-N_y} = |\text{sinc}(\pi N_y d)| = 2/\pi$ 。

对于相机系统而言,总的 MTF 为镜头光学系统与 CCD 的 MTF 的乘积,即

$$F_{MT-tot} = F_{MT-opt} \times F_{MT-CCD}. \quad (3)$$

但是由于当利用分辨率靶标测量 CCD 相机的 MTF 时,分辨率靶标不满足 MTF 测量的条件要求,不能将镜头光学系统与 CCD 的 MTF 的乘积作为相机系统的 MTF。为此可以通过傅里叶级数将矩形波展开成三角级数,再将各级数与相应频率镜头的 MTF 的乘积作为矩形波在镜头焦面处的像函数。通过像函数的波峰、波谷与 CCD 像元之间的相位关系,可得出像函数的波峰和波谷处所对应 CCD 像元的信号值。最后根据 MTF 的定义,得出 CCD 相机系统的 MTF^[10~13]。

假设 CCD 像元的宽度为 d , 则像元的成像就是在空间域内对像函数 $i'(x)$ 进行能量积分的过程。像函数 $i'(x)$ 与像元的位置关系如图 1 所示。

图 1 中 x_i, x_{i+1} 为 CCD 相邻两个像元所对应镜头像面的靶标光能函数的波峰与波谷的坐标, Δ 为波峰与其对应像元中心的偏移量。

得到 CCD 相机在奈奎斯特频率处的 MTF 为

$$F_{MT-N} = \frac{4}{\pi} H\left(\frac{1}{2d}\right) \frac{2}{\pi} \cos \frac{\pi}{d} \Delta, \quad (4)$$

式中 $H\left(\frac{1}{2d}\right)$ 为相机镜头在奈奎斯特频率处的 MTF; $\frac{4}{\pi}$ 为采用矩形靶标得到的输出调制度与采用正弦靶标得到的输出调制度之间的系数差异; $\frac{2}{\pi}$ 为 CCD 的 MTF 理论值; $\frac{4}{\pi} H\left(\frac{1}{2d}\right) \frac{2}{\pi}$ 为在奈奎斯特频率处 CCD 相机 MTF 的名义值^[14]。

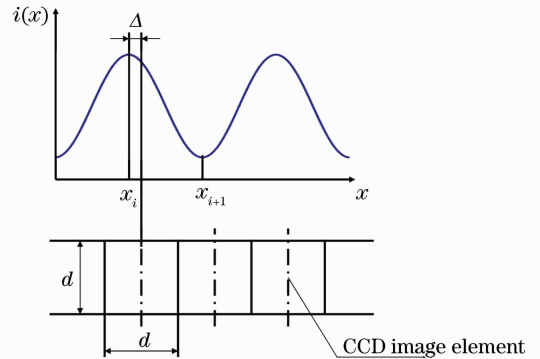


图 1 靶标像函数与 CCD 像元的位置关系示意图
Fig. 1 Position relation plot between the image function curve of the test board and the CCD image element

3 实验过程

实验的设备分别有光具座、平行光管及支架、分辨率板、匀光板、光源、三维调节台和 CCD 相机。实验原理如图 2 所示。

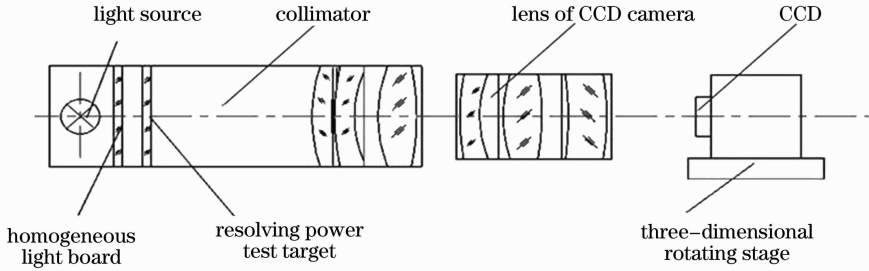


图 2 CCD 相机 MTF 测试示意图

Fig.2 MTF test chart of the CCD camera

由于使用相机的最大分辨率为 $3888 \text{ pixel} \times 2592 \text{ pixel}$ ，传感器尺寸为 $22.2 \text{ mm} \times 14.8 \text{ mm}$ ，从而可知 CCD 相机中 CCD 像元尺寸为 $5.7 \mu\text{m} \times 5.7 \mu\text{m}$ 。则相机系统的空间截止频率为 $f = 1/2d = 87 \text{ lp/mm}$ ，由于所使用的平行光管的焦距为 143 mm ，镜头焦距为 55 mm ，故矩形靶标的刻线宽 w 为

$$w = f'_1 d / f'_2 = 143 \times 5.7 / 55 = 14.82 (\mu\text{m}). \quad (5)$$

按机械行业标准 JB/T9328-1999 规定，A3 号分辨率板第 18 组线宽度为 $15.0 \mu\text{m}$ ，与选定的靶标刻线非常接近，所以测试中采用 A3 号分辨率板。将 A3 号分辨率板置于平行光管的焦面处，用以模拟无穷远处的目标；调整平行光管位置使之与 CCD 相机镜头的光轴共轴；在测试过程中注意要保持面阵 CCD 像元的行或列分别与分辨率板水平或垂直刻线方向平行；给平行光管中的光源通电，使光源发光；调节平行光管与 CCD 相机之间的距离，并调整 CCD 相机焦距、光圈等参数，观察以使所成的像清晰；按下 CCD 相机快门，完成一次照相，此时记下调节三维转台上手动旋钮的位置和所照相片在相机中所对应的序号。控制 CCD 的步进距离为 $1 \mu\text{m}$ ，测得 CCD 相机在 6 mm 范围内的 MTF。照完后，将所照相片按序号导入计算机中以待后续处理。

4 实验结果

经过计算确定奈奎斯特频率对应的是 3 号分辨率板的第 18 单元，所以在所照的分辨率板的图像中将第 18 单元截取出来，如图 3 所示。

由于每个单元都有四个方向的线对组，因此分四次来处理。以横向线对组为例进行处理，截取横向线对组（如图 4 所示），应用 Matlab 软件将其转化为灰度值图像^[15]，根据所对应的明、暗条纹的灰度值，计算出每条条纹灰度值的平均值。在暗条纹平均灰度值中选出最小平均灰度值 I_{\min} ，在明条纹平均灰度值中选出最大平均灰度值 I_{\max} 。

第 18 单元对应的横向线对组的出射调制度可由式 $M'_1 = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 计算得出，分别求出四个方向的出射调制度 M'_1 、 M'_2 、 M'_3 、 M'_4 ，第 18 单元对应的出射调制度 $M = (M'_1 + M'_2 + M'_3 + M'_4) / 4$ ，测试结果如表 1 所示。

表 1 第 18 单元调制度测试结果

Table 1 Modulation degree (MD) experimental value of the 18ht unit

CCD moving distance / μm	0	1	2	3	4	5	6
Emergent MD	0.001	0.005	0.011	0.013	0.011	0.006	0.001

经分析知道，奈奎斯特频率是能分辨的最高频率，对应的是第 18 单元，那么第 18 单元之前的单元比第 18 单元线条宽度更宽、更容易分辨。它们的出射调制度应随着单元号的减小而增大，所以第 1 单元的出射调制度最大，接近于 CCD 相机的入射调制度。因此以第 1 单元的出射调制度来代替 CCD 相机的入射调制度，计算 CCD 相机的 MTF。第 1 单元出射调制度测试结果如表 2 所示。

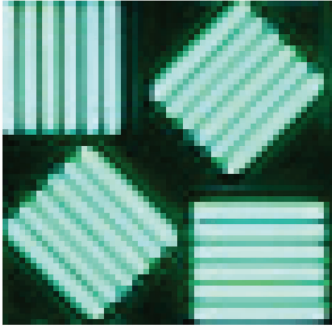


图3 3号分辨率板第18单元截取图

Fig. 3 18th unit in the No. 3 resolving power test target



图4 第18单元横向线条组

Fig. 4 Transverse direction line group in the 18th unit

由 MTF 的定义,即 MTF 为出射调制度与入射调制度的比值,利用以上数据可得在奈奎斯特频率处相机的 MTF,如表 3 所示。

表2 第1单元调制度测试结果

Table 2 MD experimental value of the 1st unit

CCD moving distance / μm	0	1	2	3	4	5	6
Emergent MD	0.047	0.048	0.059	0.061	0.059	0.056	0.052

表3 奈奎斯特频率处相机 MTF 的测试值

Table 3 MTF experimental value of the CCD camera at Nyquist frequency

CCD moving distance / μm	0	1	2	3	4	5	6
Test value of MTF	0.021	0.104	0.186	0.214	0.186	0.107	0.019

由表 3 可以看出,CCD 移动量为 $3 \mu\text{m}$ 时,系统 MTF 最大为 0.214,说明此时波峰与其对应像元中心的偏移量 Δ 为 0。由于 CCD 相机镜头在奈奎斯特频率处的 MTF 为 0.3,利用(4)式可计算出系统在奈奎斯特频率处的 MTF,计算结果如表 4 所示。

表4 奈奎斯特频率处相机 MTF 的计算值

Table 4 MTF calculated value of the CCD camera at Nyquist frequency

CCD moving distance / μm	0	1	2	3	4	5	6
Calculated value of MTF	0.020	0.110	0.207	0.243	0.207	0.110	0.020

由表 3 和表 4 拟合实验测试值和计算值曲线,得到图 5 所示曲线。

由图 5 可以看出,实验测试值和理论计算值曲线基本相同,且符合余弦变化趋势,说明实验结果和理论计算相符。但是二者在幅值上有一定差异,这是由于理论计算值是在理想情况下获得,忽略了光源的均匀性、平行光管的 MTF、CCD 响应特性等因素的影响。而在实验中存在靶标线度的差异、CCD 像元与输入信号间的相位变化、测试靶标与 CCD 响应等因素对系统 MTF 的影响,因此实验测试值和理论计算值之间存在差异。

5 结 论

对 CCD 相机的 MTF 进行测试时,正弦函数是理想的靶标函数。但是制作光出射度随正弦波规律变化的分辨率板是非常困难的,精度不易保证,所以在实际测试中通常采用矩形靶标。但要注意采用矩形靶标得到的输出调制度与采用正弦靶标得到的输出调制度之间的系数差异为 $4/\pi$ 。本文从 MTF 的定义出发,对

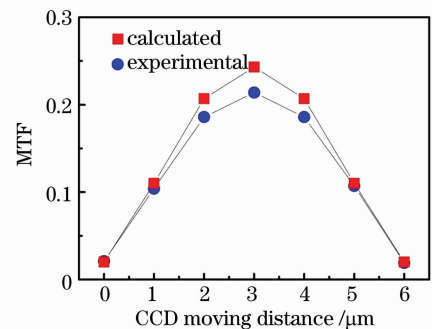


图5 实验测试值和计算值曲线

Fig. 5 Comparison between experimental value and calculated value

CCD相机的MTF进行了理论分析。对CCD相机的MTF进行实验测试,所得的实验结果与理论计算结果基本相符。

参 考 文 献

- 1 Guo Yue, Liu Xiaopeng, Yang Hua. MTF analysis for CCD[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2004, **25**(3): 25~28
郭悦, 刘晓鹏, 杨桦. CCD的调制传递函数(MTF)分析[J]. *航空返回与遥感*, 2004, **25**(3): 25~28
- 2 Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2891~2897
李铁成, 陶小平, 冯华君等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2891~2897
- 3 Chen Rongli, Li Yingcai, Fan Xuewu. Investigation on synthetically evaluating image quality of TDI-CCD cameras[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, **24**(4): 10~13
陈荣利, 李英才, 樊学武. TDI-CCD相机像质综合评价研究[J]. *航天返回与遥感*, 2003, **24**(4): 10~13
- 4 Chang Lingying, Zhao Baochang, Yang Jianfeng *et al.*. Optical system design of a two-linear array stereoscopic mapping CCD camera[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0803001
常凌颖, 赵葆常, 杨建峰等. 两线阵立体测绘CCD相机光学系统设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0803001
- 5 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
- 6 Qu Guozhi, Xiao Zuojiang. Measurement and analysis of modulation transfer function (MTF) based on CCD aerial camera [J]. *Journal of 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
- 7 Xu Baoshu, Shi Zelin, Feng Bin. Modulation transfer function measurement method of electro-optical imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1111004
徐保树, 史泽林, 冯斌. 一种光电成像系统调制传递函数的测量方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1111004
- 8 Che Shuangliang, Wen Desheng. The modulation transfer function of linear array CCD [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **22**(5): 4~6
车双良, 汶德胜. 线阵CCD的调制传递函数[J]. *应用光学*, 2001, **22**(5): 4~6
- 9 Xu Zhonghua, Fang Jiaxiang. Crosstalk calculation from modulation transfer function curves of infrared focal plane arrays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(4): 041101
许中华, 方家熊. 利用红外焦平面调制传递函数曲线计算串音值[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(4): 041101
- 10 Zhao Yun, Li Yingchun, Sun Huayan *et al.*. Interrelation design for improving performance of laser active imaging system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 071101
赵云, 李迎春, 孙华燕等. 提高激光主动成像系统性能的匹配设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(7): 071101
- 11 Ding Shenghui, Li Qi, Li Yunda *et al.*. Experimental research on resolution measurement of a continuous-wave terahertz reflection-mode scanning system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1011001
丁胜晖, 李琦, 李运达等. 连续太赫兹反射扫描成像分辨率测量实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1011001
- 12 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
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
- 13 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): 697~701
张晓辉, 韩昌元, 潘玉龙等. 传输型CCD相机综合像质评价方法的研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(4): 697~701
- 14 Duan Yaxuan, Chen Yongquan, Zhao Jianke *et al.*. A new adaptive background correction method based on pinhole image analysis in optical system modulation transfer function measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812008
段亚轩, 陈永权, 赵建科等. 一种基于针孔像分析的光学系统调制传递函数测量的自适应背景校正方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0812008
- 15 Guan Yingzi, Han Sining. Development of a test software for the modulated transfer function of CCD camera [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **25**(6): 54~56
关英姿, 韩四宁. CCD相机调制传递函数测试软件的研制[J]. *应用光学*, 2004, **25**(6): 54~56