

高分辨相机传函测试误差分析

贺小军, 张贵祥, 郑亮亮, 曲宏松

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:文中通过对高分辨相机静态传函测试中误差产生的机理进行分析,提出了相应的测试策略,有效抑制条纹靶标周期偏差、环境振动及图像噪声对 MTF 的影响。TDI CCD 相机的 MTF 测试值受到条纹靶标周期偏差、环境振动和图像噪声的影响,通过分析上述因素对 MTF 测量值的影响机理,建立了条纹靶标周期偏差、环境振动和图像噪声对传函的影响模型,并分别提出了针对条纹靶标周期偏差引入的 MTF 测量值修正方法,以及针对噪声影响提出了 MTF 计算模板的最优化选取算法,通过最优化模板计算得到的 MTF 测量值可以有效抑制图像噪声的影响,同时抑制环境振动以及条纹靶标周期偏差引起的摩尔条纹对 MTF 测量值的影响。根据对某空间相机实测图像的分析结果,横向模板尺度应不大于摩尔条纹横向周期的 4%,纵向模板的尺度应不大于摩尔条纹纵向周期的 2%,分析表明模板越大,MTF 受噪声影响越小,但受环境振动和条纹靶标周期偏差影响越大,实际工程中应结合相机本身的噪声水平,在最优区间选取 MTF 计算模板,使得测量值更准确。

关键词:空间相机; TDI CCD; 调制传递函数; 测试方法

中图分类号:TP701 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-2276(2014)S-0089-06

Testing error analysis of high resolution camera modulation transfer function

He Xiaojun, Zhang Guixiang, Zheng Liangliang, Qu Hongsong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The Methods was proposed based on the analysis of Modulation Transfer Function (MTF) test error of spaceborne TDI CCD camera, the influence from grating period error, environment vibration and imaging noise was retained from MTF testing. The MTF testing is affected by grating period error, environment vibration and imaging noise. Through analyzing the influence mechanism, a mathematic module was established to describe the influence of grating period error, environment vibration and imaging noise. The correcting algorithm of the testing MTF error from grating period error was proposed, and the optimization mask of MTF testing was also proposed to reduce the influence from image noise. Based on the testing images, the horizontal scale of MTF mask should not exceed 4% of the Morie fringe horizontal period, the vertical scale of MTF mask should not exceed 2% of the Morie fringe vertical period. The analysis shows that if the mask is larger, the influence from noise is reduced, but the influences from the environment vibration and grating period error will increase. In the real project, the mask scale should be selected based on the imaging system noise level, and ensure the accuracy of the MTF testing.

Key words: spaceborne camera; TDI CCD; MTF; test method

收稿日期:2014-10-10; 修订日期:2014-11-15

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划(2012AA121502)

作者简介:贺小军(1983-),男,副研究员,博士,主要研究方向为 TDI CCD 成像技术、图像处理与压缩技术。Email: hexiaojun6@163.com

0 引言

调制传递函数(MTF)是光学传递函数(OTF)的模,反映了成像系统对于余弦信号振幅的响应特性,是成像系统质量评价的关键指标。

高分辨 TDI CCD 空间相机由于具有长焦距、大 F 数、短积分时间,使得系统对振动环境敏感,曝光量较小,噪声相对较大,不利于调制传递函数的精确测试。目前国内普遍采用长焦距的大型平行光管作为测试设备,模拟产生无穷远目标发出的准平行光^[1-2]。聂品等分析了矩形靶标测量 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,给出了调制度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^[3]。李国宁等为了解决大视场时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)相机静态传递函数(TF)测试过程中视场覆盖率不高、测试精度和效率较低等问题,设计了一种全视场静态 TF 自动测试系统^[4]。基于图像的 MTF 测试也是近年来的研究热点,其中的噪声抑制方法值得借鉴^[5]。曲国志等在调制传递函数的理论分析基础上,通过对分辨率靶标在相机镜头焦面成像位置与 CCD 像元之间的偏移,对 CCD 相机调制传递函数的影响进行分析,建立数学模型,并对 CCD 相机系统在奈奎斯特频率处的调制传递函数进行了测试^[6]。以上研究成果对条纹靶标法测量 MTF 进行了较详细的阐述,其中许多技术也已经应用到工程实践中。但是针对高分辨空间相机的低曝光度特性,噪声的影响更加明显,要测试准确的 MTF 值,必须有效抑制噪声的影响,同时,长焦距特性使得相机的角分辨率达到了亚角秒级别,环境的轻微振动都会引起 MTF 测试图像的晃动,形成摩尔条纹。

文中旨在针对高分辨相机的 MTF 测试中遇到的问题,通过理论分析的方式,给出最佳的 MTF 测试模板,在抑制噪声的同时避免条纹靶标周期偏差及振动引起的摩尔条纹现象对 MTF 测试产生消极影响。

1 条纹靶标周期偏差对 MTF 测量值的影响及修正方法

如图 1 所示,MTF 测试系统包含平行光管系统

和相机系统两大部分,平行光管系统包含直流光源、条纹靶标和平行光管光学系统,其功能是产生受条纹靶标调制后的准平行光,模拟无穷远目标的光线;相机系统包括相机光学系统和相机成像系统,实现对准平行光的成像和图像的获取。

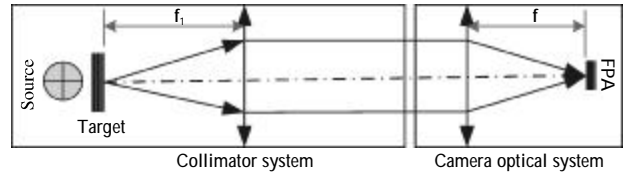


图 1 MTF 测试系统示意图

Fig.1 MTF test system

条纹靶标的周期为 $2d_0$ 平行光管焦距为 f_1 , 相机焦距为 f , 则像面上黑白条纹的周期为 $2d_1$ 可由公式(1)计算得到。

$$2d_1 = \frac{2d_0 f}{f_1} \quad (1)$$

理论上 $d_1 = d$, 其中 d 为 TDI CCD 像元尺寸。由于光刻误差、平行光管焦距误差以及 TDI CCD 相机光学焦距误差等因素的影响, 会使得 $d_1 = (1+k)d$, 其中 k 为相对误差系数, 绝对值一般要求小于 2%。

条纹靶标调制后光经过平行光管光学系统、相机光学系统之后, 由于光学系统对高频分量的衰减很快, 所以高阶分量可以忽略, 到达焦平面后主要为基频分量, 其方程可表示为:

$$I(x) = I_0 + I_j \sin\left(\frac{\pi}{1+k} \frac{x}{d}\right) \quad (2)$$

式中: I_0 为光强直流分量; I_j 为光强交流分量幅值; x 为横坐标。

利用像元尺寸为 d 的 CCD 对该光信号进行采样, 则得到的图像信号可表示为:

$$I_{\text{CCD}}(m) = \int_{(m-1)d}^{md} I_0 + I_j \sin\left(\frac{\pi}{1+k} \frac{x}{d}\right) dx \quad (3)$$

令 d 为单位 1, 则公式(3)变换为:

$$I_{\text{CCD}}(m) = I_0 + \frac{2(1+k)}{\pi} I_j \sin\left[\frac{\pi}{1+k} \left(m - \frac{1}{2}\right)\right] \sin\left[\frac{\pi}{2(1+k)}\right] \quad (4)$$

从采样结果可以看出, 实测图像的交流分量幅值表示为:

$$I_j = \frac{2(1+k)}{\pi} I_j \sin\left[\frac{\pi}{2(1+k)}\right] \quad (5)$$

所以在理论测量 MTF 值与理论测量值的关系可表示为:

$$MTF = MTF_0 \left| \frac{(1+k)\sin^2 \frac{\pi}{2(1+k)} \cos\left(\frac{\pi m}{1+k}\right)}{1 + MTF_0 \frac{1+k}{2} \sin \frac{\pi}{1+k} \sin \frac{\pi m}{1+k}} \right| \quad (6)$$

为了求取最大传函值及其所产生的位置,对上式求导,得到:

$$\frac{dMTF}{dm} = - \frac{MTF_0^2 \pi^2 \sin^2 \frac{\pi}{2(1+k)} \sin \frac{m\pi}{1+k} \sin\left(\frac{\pi}{1+k}\right) \cos\left(\frac{\pi}{1+k}\right)}{\left(1 + \frac{1}{2} MTF_0 (1+k) \sin\left(\frac{\pi}{1+k}\right) \sin\left(\frac{\pi m}{1+k}\right)\right)^2} \quad (7)$$

当 $\frac{dMTF}{dm} = 0$ 时,取得测量传函的极值,所以取得测量传函极值的条件可用公式(8)表示:

$$\sin \frac{m\pi}{1+k} = 0 \quad (8)$$

但由于 m 为离散量,根据三角函数的周期性,所以传函极值的条件,即是摩尔条纹周期可用公式(9)表示:

$$m = \frac{1+k}{k} \quad (9)$$

则当误差 k 为 0.01 时,最小摩尔条纹周期为 101 像素,当 $k = -0.01$ 时,最小摩尔条纹周期为 99 像素。摩尔条纹示意图如图 2 所示。

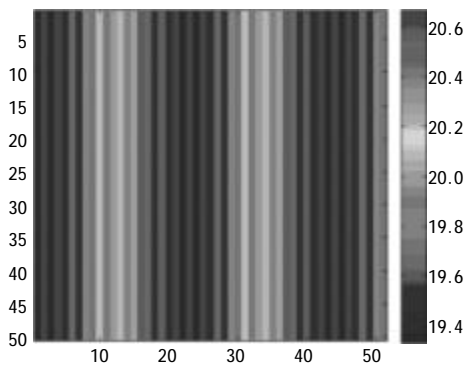


图 2 传函测试中的摩尔条纹
Fig.2 Morie fringe of MTF test image

当 MTF 测试时所获取的图像的摩尔条纹周期不为无穷大时,表明条纹靶标周期与相机分辨率不完全匹配,但是,无法直接判定出条纹靶标周期偏差的正负。

文中提出利用偏流调整,来实现条纹靶标周期偏差符号的判定(见图 3)。

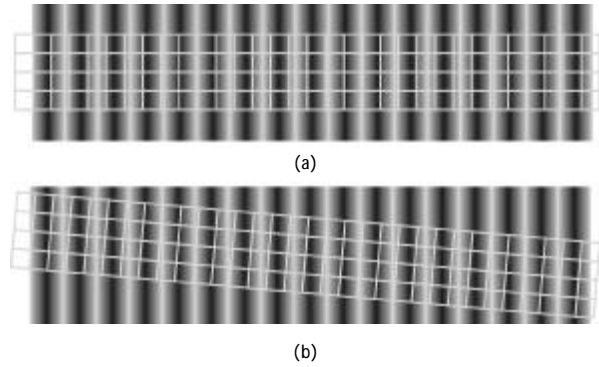


图 3 调偏流判定周期偏差符号
Fig.3 Confirm the sign of period bias

首先,在高积分级数下,提高 MTF 对偏流角的灵敏度,调整偏流角的值,将 MTF 值调至最大,表明当前的偏流角残差趋近于零,视为偏流机构的理想位置。

将积分级数调至最低,降低偏流角对成像质量的影响,步进式调整偏流机构,若此时摩尔条纹的周期先增大,再减小,则表明条纹靶标周期误差为负向偏差,即条纹靶标在焦平面上所成像的条纹周期小于 TDICCD 像元尺寸;若摩尔条纹周期单调减小,则表明条纹靶标周期误差为正向偏差,即条纹靶标在焦平面上所成像的条纹周期大于 TDICCD 像元尺寸;

通过判定条纹靶标周期偏差的大小及符号,就可以利用公式进行修正,修正因子可表示为:

$$k_p = (1+k) \sin^2 \frac{\pi}{2(1+k)} \quad (10)$$

则理论 MTF 值可根据公式(11)进行修正得到:

$$MTF_0 = \frac{MTF}{k_p} \quad (11)$$

即当 k 为负时,MTF 的测试值略高于理论值,当 k 为正时,MTF 测试值略低于理论值。

2 噪声对 MTF 测试值的影响及其抑制方法

噪声在 MTF 测试中是一个主要干扰因素,图像噪声会使 MTF 测量值高于实际水平。理论上,MTF 的测试计算公式如公式(12)所示,只需采用 1×2 的模板进行整个图像的遍历,取其最大值为 MTF 值。

$$MTF = \frac{\pi}{4} \sum_{\max}^{i,j} \left\{ \frac{|I(i,j) + \sigma(i,j) - [I(i,j+1) + \sigma(i,j+1)]|}{I(i,j) + \sigma(i,j) + [I(i,j+1) + \sigma(i,j+1)]} \right\} \quad (12)$$

式中: I 为理想情况下的无噪声图像; i, j 为图像行列

像素序号; σ 为图像噪声,满足相同的概率分布函数,其分布范围为 $[-\varepsilon, \varepsilon]$,当相邻两个像素的噪声幅值最大但符号相反时,MTF 出现一个异常的极大值。

$$MTF = \frac{\pi}{4} \frac{|I_{max} - I_{min}| + 2\varepsilon}{|I_{max} + I_{min}|} \quad (13)$$

式中: I_{max} 为无噪声理想图像灰度极大值; I_{min} 为无噪声理想图像灰度极小值,所以会使得 MTF 比理论值增大。以 I_{max} 为 140, I_{min} 为 100, ε 为 4 进行计算,其实测 MTF(0.157)比理论值(0.131)增大 0.026,相对误差达到了 20%,严重影响到了 MTF 测试值的可信度。

为了获得更为准确的 MTF 值,需要提高光照强度,以增大图像亮度,同时降低增益参数,抑制噪声水平。

为了抑制噪声对 MTF 测量值的影响,一般采用多行平均的方法进行 MTF 计算,图 4 所示为不同模板大小下的 MTF 测试曲线,其中 f1~f6 分别代表模板大小从 1×2 到 6×2。

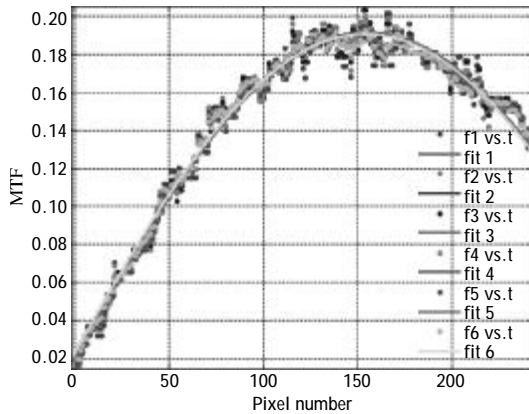


图 4 不同模板下 MTF 测量值
Fig.4 MTF test value of different mask

$$MTF = \frac{\pi}{4} \sum_{\max}^{i,j} \left(\frac{\sum_{k=0}^{k=M} I(i+k,j) + \sigma(i+k,j) - \sum_{k=0}^{k=M} I(i+k,j+1) + \sigma(i+k,j+1)}{\sum_{k=0}^{k=M} I(i+k,j) + \sigma(i+k,j) + \sum_{k=0}^{k=M} I(i+k,j+1) + \sigma(i+k,j+1)} \right) \quad (14)$$

M 为 MTF 计算模板的行数,一般取 3~5,由于噪声出现极大值的概率极低,所以可以认为每个处理模板内只会出现一对极大噪声,所以可以近似表示为公式(15)。

$$MTF = \frac{\pi}{4} \frac{|I_{max} - I_{min}| + \frac{2\varepsilon}{M}}{|I_{max} + I_{min}|} \quad (15)$$

式中: M 为模板的大小,在 $X \times Y$ 的模板中, M 的大小为 $X \times Y$,表示进行了 M 个样本的叠加,用于消除噪声对 MTF 测量值的影响。

3 环境振动与 MTF 计算模板的选取

通过增大模板的尺寸,可以增强 MTF 计算时的噪声抑制能力,但是,随着 M 的增大,环境振动引入的影响会逐渐限制,从而上升为影响 MTF 测试的主要因素。如图所示为某相机实际 MTF 测量图,根据图像分析所得的 MTF 呈现明显的周期性,该周期性即为环境振动引起,周期约为 300 行图像,因为成像时的行频为 6 kHz,则环境振动周期约为 20 Hz。

图 5 所示为某航天相机的 MTF 试验中所采集的图像的局部增强图,图中中部倾斜的模糊区域为条纹靶标周期偏差引起的摩尔条纹(理论为竖直)在环境振动下形成的倾斜模糊带。通过对原图进行 MTF 计算,获得图 6 所示的图像各个区域对应的 MTF 数值分布图。



图 5 摩尔条纹实测图

Fig.5 Morie fringe of MTF testing

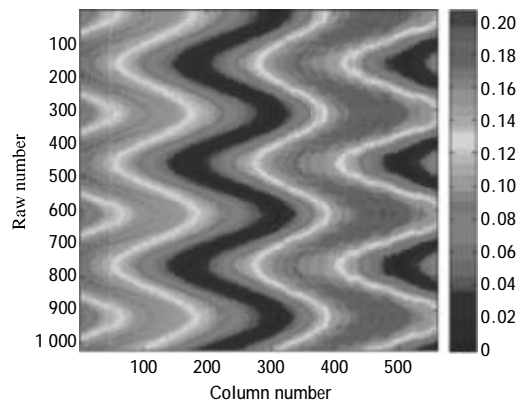


图 6 某航天相机 MTF 测试结果

Fig.6 MTF testing result of a space camera

首先在整幅图像中按照 1×2 的最小模板找出最大 MTF 位置, 然后对该区域进行其他模板的 MTF 计算, 并对计算结果的峰值区域进行正弦函数拟合, 求取拟合曲线的峰值 MTF, 视为消除噪声后的 MTF 最大值, 通过对不同模板大小的 MTF 计算及拟合, 得到如图所示的曲线, 表明随着模板的增大, 对噪声的抑制能力越来越强, 但同时受环境振动影响越来越大, 为了获得接近真实情况的 MTF, 应将模板大小进行最优化选取。

图 7 所示为不同横向尺度、不同纵向尺度模板下, 最佳 MTF 值的变化曲线, 其中由左下角向右上角 MTF 测量值依次递减, 说明模板逐渐增大过程中, 条纹靶标周期偏差和环境振动引起的摩尔条纹会使得 MTF 测量值逐渐偏离真实值, 所以应该保证噪声抑制效果的基础上, 选取较小的模板尺度。

图 8 所示为增大纵向模板尺度时, MTF 的变化情况, 从图中可以看出, 在逐渐增大纵向尺度时, MTF 由有一个快速下降区, 这是因为该区间主要是消除噪声使得 MTF 测量值更接近真实值, 第二个区间呈现较为平坦的特性, 表明该区间已经有效抑制噪声的影响, 且还未引入环境振动的不良影响, 第三区间出现直线下降的趋势, 表明此时因为模板选取过大, 环境振动的影响已经占主导因素。

从图 7 中可以看出, 当模板小于 3×2 时, MTF 测量值偏高, 其主要原因是受噪声干扰严重, 当模板为 3×2 到 6×2 时, 出现第一个稳定台阶, 说明在此模板下, 噪声得到了有效抑制, 且 MTF 测试值受环境振动的影响基本可以忽略。当模板大于 18×2 时, MTF 测试值急剧下降, 表明模板过大引起对环境振动过于敏感。为了有效抑制噪声的同时, 避免环境的

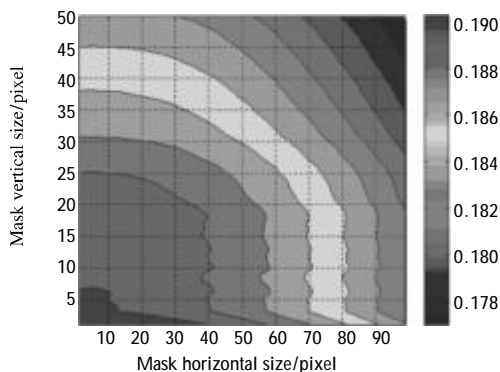


图 7 不同模板大小下的 MTF 测量值

Fig.7 MTF testing value of different mask size

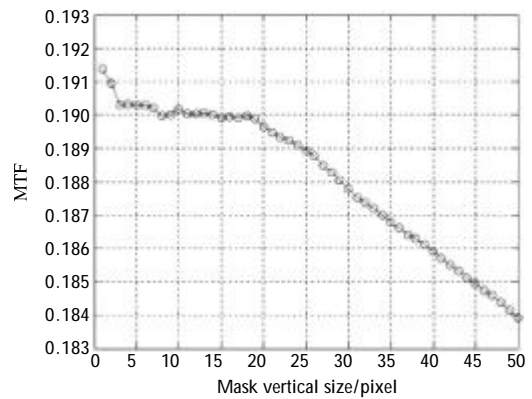


图 8 纵向模板大小对 MTF 测量值的影响

Fig.8 Influence reaction between MTF testing value and vertical mask size

影响, 该工程项目中选用了 3×2 和 5×2 两种模板进行 MTF 测试。由于振动引起的摩尔条纹的周期约为 300 行左右, 所以得出初步结论, 模板纵向尺度小于摩尔条纹周期的 2% 时, 环境振动对 MTF 测试的影响可以基本忽略。

如图 9 在横向模板的选择上, 当模板小于 8 时, 条纹靶标周期误差引起的摩尔条纹对 MTF 测试值的影响可以忽略。结合该测试中横向摩尔条纹周期为 200 pixel 左右, 所以得出初步结论: 当模板横向尺寸小于摩尔条纹横向周期的 4% 时, 条纹靶标周期误差引起的摩尔条纹对 MTF 测量无明显影响。

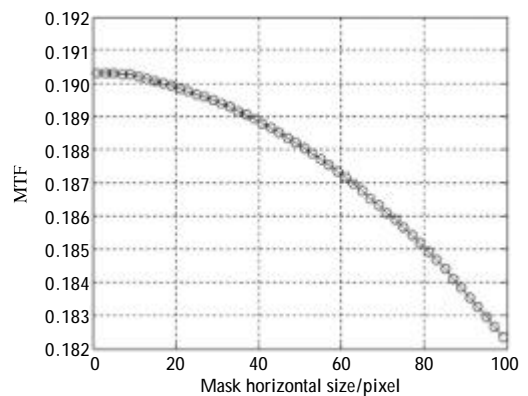


图 9 横向模板大小对 MTF 测量值的影响

Fig.9 Influence reaction between MTF testing value and horizontal mask size

根据相机的噪声水平, 以及对信噪比相对误差的容限, 可以计算出最佳的 M 值, 再根据当时的摩尔条纹周期, 分别给出最佳模板的横向和纵向尺寸。在选取时, 遵循横向模板不大于横向摩尔条纹的

4%,纵向模板不大于纵向摩尔条纹的 2%,则可以忽略条纹靶标周期误差和环境振动引起的摩尔条纹现象对 MTF 测量值的影响。

4 结 论

MTF 测试过程中面临的首要问题是模板的选取方式,文中通过理论分析,给出了模板选取的指导原则,综合考虑噪声抑制水平、环境振动、条纹靶标周期偏差等三个因素的影响,并根据成像摩尔条纹的横纵周期以及图像的噪声水平,模板不大于横向摩尔条纹周期的 4%,纵向模板不大于纵向摩尔条纹周期的 2%,给出了切实可行的最优模板选择方案,对实际工程实践有指导意义。

参考文献:

- [1] He Xu, Wu Guodong. Testing device for modulation transfer function of push-bloom electro-optical imaging system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(1): 1-8. (in Chinese)
何煦, 吴国栋. 推扫式光电成像系统调制传递函数测试装置的设计[J]. *应用光学*, 2013, 34(1): 1-8.
- [2] Li Jin, Chen Yuwei, Chen Hongbing, et al. Research on MTF measurement technique for CCD [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(4): 531-533. (in Chinese)
李金, 陈于伟, 陈红兵, 等. 矩形光栅法测量 CCD 调制传递函数的研究[J]. *半导体光电*, 2009, 30(4): 531-533.
- [3] Nie Pin, Tian Haiying, Dong Bin, et al. Research of modulation transfer function measurement of CCD camera with rectangle target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 38-42. (in Chinese)
聂品, 田海英, 董斌, 等. 矩形靶标测试 CCD 相机调制传递函数的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 38-42.
- [4] Li Guoning, Liu Yanyan, Jin Longxu, et al. Automatic test system for static transfer function of the big visual field time-delayed integration charge coupled device camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 11(11): 3171-3176. (in Chinese)
李国宁, 刘妍妍, 金龙旭, 等. 大视场时间延迟积分电荷耦合器件相机静态传递函数自动测试系统 [J]. *光学学报*, 2010, 11(11): 3171-3176.
- [5] Ma Weihong, Li Xi. Research of noise suppression method in MTF measurement based on image analysis [J]. *Optical Technique*, 2013, 39(3): 233-236. (in Chinese)
马卫红, 李希. 图像分析法测试光学传递函数中的噪声抑制[J]. *光学技术*, 2013, 39(3): 233-236.
- [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 (Nature Science Edition)*, 2010, 33 (2): 18-22. (in Chinese)
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): 18-22.