

文章编号 1004-924X(2015)05-1484-06

空间光学相机在乃奎斯特频率处的 调制传递函数测试与实验

吕恒毅*, 薛旭成, 赵运隆, 韩诚山

(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:为了精确地测试空间光学相机入轨之前在乃奎斯特频率处的调制传递函数,开展了整机在乃奎斯特频率处的传递函数测试实验。给出了相机在乃奎斯特频率处的调制传递函数测试链路图;推导了乃奎斯特频率的方波靶标在整个链路中的传递过程和终端靶标图像的精确对比度函数模型;计算了终端靶标图像的对比度与相机在乃奎斯特频率处的调制传递函数转换关系和理论误差形式。最后,在真空环境下测试了相机在乃奎斯特频率下的调制传递函数,并依据本文推导的结论对结果进行了修正。实验结果表明:某空间光学相机在实验室条件下测得的乃奎斯特频率处的调制传递函数为 0.213,经折算时间延迟积分 CCD(TDICCD)及处理电路的调制传递函数为 0.602,TDICCD 外围处理电路的调制传递函数等效衰减系数为 0.946,与理论值接近。测试结果表明提出的方法基本准确,能够满足空间光学相机地面研制阶段对调制传递函数测试的要求。

关键词:空间光学相机;乃奎斯特频率;调制传递函数;对比度传递函数

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1484

Measurement and experiment of modulation transfer function at Nyquist frequency for space optical cameras

LÜ Heng-yi*, XUE Xu-cheng, ZHAO Yun-long, HAN Cheng-shan

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

* Corresponding author, E-mail: lv_hengyi@163.com

Abstract: To precisely measure the Modulation Transfer Function (MTF) of a space camera at the Nyquist frequency before entering orbit, measuring methods were researched and some experiments for measuring the MTF at the Nyquist frequency were carried out. The schematic diagram of the MTF measurement was given. On the basis of the schematic diagram, the transfer process of a square wave target at Nyquist frequency in whole chain and the contrast ratio model of a terminal target image were investigated. Furthermore, the relationship between the contrast ratio of terminal target image and the MTF at Nyquist frequency and the error formation were given. Finally, the MTF at Nyquist frequency of the camera was measured in a vacuum environment and the obtained results were corrected. The result shows that the MTF of a space camera at Nyquist frequency is 0.213 at a lab condition, and that after the optical system in the camera architecture is 0.602 by conversion.

收稿日期:2014-04-21;修订日期:2014-06-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61036015)

Moreover, the MTF after Time Delay and Integration(TDICCD) is calculated as 0.946, which is close to the theoretical value. These results indicate that the derivation of our method is basically precise, and is capable of satisfying the requirement of space optical cameras for the MTF measurement before entering orbit.

Key words: space optical camera; Nyquist frequency; modulation transfer function; contrast ratio transfer function

1 引言

由于光学系统的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)^[1-3]能够客观地评价成像质量,它已成为衡量光学系统成像质量的关键指标之一。目前,在空间光学相机的地面检定过程中,整个相机系统在乃奎斯特频率处的调制传递函数是相机交付前必须检测的重要指标,有必要予以深入讨论。空间光学相机系统通常由光学系统、时间延时积分电荷耦合器件(Time Delay Integration Charge Coupled Device, TDICCD)^[4-5]和相关电路三部分组成。其中,TDICCD对光能量空间采样过程^[6]的介入使得整体相机系统的MTF较相机光学系统的MTF产生了一定的变化。整体相机系统在乃奎斯特频率处的MTF定义为:相机对乃奎斯特频率的正弦靶标成像,靶标图形与探测器像元相位对齐时,输出数值图像的调制度与输入靶标信号的调制度之比。但在实际应用中,受制造工艺的限制,透过率为正弦规律的乃奎斯特频率靶标不易得到,因此通常采用乃奎斯特频率的方波靶标进行对比度传递函数(Contrast ratio Transfer Function, CTF)^[7-10]测试,通过对结果进行转换和修正来得到系统在乃奎斯特频率处的MTF值,该方法行之有效。本文对乃奎斯特频率方波信号在相机各环节中的传递形式进行了推导和深入讨论,并据此推导出在乃奎斯特频率处空间光学相机的CTF和MTF的精确关系和实用近似公式,以及截断误差补偿量。

2 乃奎斯特频率处 MTF 测试原理

2.1 MTF 测试链路构成

图1为空间光学相机在乃奎斯特频率处MTF检测的测试系统示意框图。

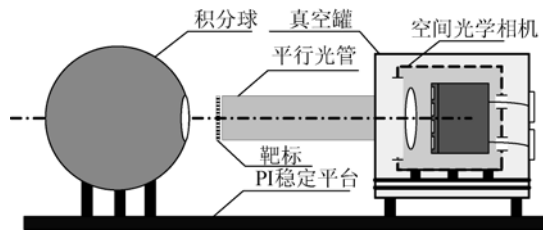


图1 空间光学相机的 MTF 测试链路图

Fig. 1 Schematic diagram of MTF measurement for space optical camera

2.2 测试原理

目前,空间光学相机大多为采用TDICCD的推扫式相机,其对相机MTF的测试,通常是指对相机在TDICCD像元排列方向(即与推扫方向垂直的方向)的静态MTF进行测试。

首先,理论推导出整体相机系统在乃奎斯特频率处MTF。

当采用透过率按正弦规律变化的乃奎斯特频率靶标时,经均匀光照射后,透过靶标在光学系统入口处的光能分布函数可用式(1)表示:

$$y(x) = \alpha + \beta(1 + \cos(2\pi f_N x)), \quad (1)$$

其中: α 为偏置; β 为振幅; f_N 为乃奎斯特频率。由此可知该函数的调制度如式(2)所示:

$$\gamma_m = \beta / (\alpha + \beta). \quad (2)$$

该函数经过光学系统后,在TDICCD像面上的光能分布函数可用式(3)表示:

$$\lambda_1(x) = \alpha + \beta(1 + \Phi(f_N) \cdot \cos(2\pi f_N x)), \quad (3)$$

其中: $\Phi(f_N)$ 为相机光学系统在乃奎斯特频率处的MTF。TDICCD对其接收面上的光照进行积分采样,若式(3)的相位与TDICCD像元对齐,则经TDICCD对光能采样后,积分得到的能量最大值和最小值分别如式(4)和式(5)所示:

$$E_{\max} = \int_{-d/2}^{d/2} \lambda_1(x) \cdot dx = d \cdot [\alpha + \beta(1 + (2/\pi) \cdot \Phi(f_N))], \quad (4)$$

$$E_{\min} = \int_{d/2}^{3d/2} \lambda_1(x) \cdot dx =$$

$$d \cdot [\alpha + \beta(1 - (2/\pi) \cdot \Phi(f_N))]. \quad (5)$$

其中: E_{\max} 为 TDICCD 积分能量的最大值; E_{\min} 为 TDICCD 积分能量最小值; d 为 TDICCD 的像元尺寸, 且有 $f_N = 1/2d$ 。由于 TDICCD 的电荷-电压转换是线性的, 因此经处理电路后输出数值图像的调制度如式(6)所示:

$$\gamma_{\text{out}} = [\beta/(\alpha + \beta)] \cdot [2/\pi] \cdot \Phi(f_N) \cdot \eta, \quad (6)$$

其中: η 为成像电路的 MTF 衰减系数; $2/\pi$ 为 CCD 空间采样的 MTF; η 主要取决于电荷转移效率、电子学系统带宽、CCD 信号采样位置和成像电路信噪比等, 且 $0 < \eta < 1$ 。因此, 空间光学相机在乃奎斯特频率处的 MTF 的理论值如式(7)所示:

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{i+1}}{2i-1} \cdot \cos[2\pi(2i-1)f_N x], \quad (9)$$

则经过光学系统后, 在 TDICCD 像面处的光

$$\lambda_2(x) = \alpha + \beta \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{i+1}}{2i-1} \cdot \Phi[(2i-1)f_N] \cdot \cos[2\pi(2i-1)f_N x] \right\}. \quad (10)$$

TDICCD 对其接收面上的光照进行积分采样, 若式(10)的相位与 TDICCD 像元对齐, 则经

$$\Gamma_{\max} = \int_{-d/2}^{d/2} \lambda_2(x) \cdot dx = d \cdot \left[\alpha + \beta \left(1 + \frac{4}{\pi} \cdot \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{\Phi[(2i-1)f_N]}{(2i-1)^2} \right) \right], \quad (11)$$

$$\Gamma_{\min} = \int_{d/2}^{3d/2} \lambda_2(x) \cdot dx = d \cdot \left[\alpha + \beta \left(1 - \frac{4}{\pi} \cdot \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{\Phi[(2i-1)f_N]}{(2i-1)^2} \right) \right]. \quad (12)$$

则经过成像电路后的数值图像的对比如式

$$\zeta_{\text{out}} = \left[\frac{\beta}{\alpha + \beta} \right] \cdot \left[\frac{4}{\pi} \right] \cdot \left[\frac{2}{\pi} \right] \cdot \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{\Phi[(2i-1)f_N]}{(2i-1)^2} \cdot \eta \quad (13)$$

所以, 空间光学相机在乃奎斯特频率处的

$$CTF_{\text{camera}}(f_N) = \zeta_{\text{out}} / \zeta_{\text{in}} = \left[\frac{4}{\pi} \right] \cdot \left[\frac{2}{\pi} \right] \cdot \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{\Phi[(2i-1)f_N]}{(2i-1)^2} \cdot \eta \quad (14)$$

由式(14)可知, 整体相机系统在乃奎斯特频率处的 CTF 与相机光学系统在乃奎斯特频率的奇数

$$CTF_{\text{camera}}(f_N) = \left[\frac{4}{\pi} \right] \cdot \left\{ MTF_{\text{camera}}(f_N) + \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{\Phi[(2i+1)f_N]}{(2i+1)^2} \cdot \eta \right\}. \quad (15)$$

由式(15)可见, 高频分量的符号均为“+”号, 全部舍掉是不科学的, 且会导致测量结果比真实值偏大。由式(15)得到的空间光学相机在乃奎斯特频率处的 MTF 的理论值如式(16)所示:

$$MTF_{\text{camera}}(f_N) = \frac{\pi}{4} CTF_{\text{camera}}(f_N) + \epsilon, \quad (16)$$

其中, ϵ 由式(17)给出。

$$\epsilon = -\frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{\Phi[(2i+1)f_N]}{(2i+1)^2} \cdot \eta < 0. \quad (17)$$

$$MTF_{\text{camera}}(f_N) = \gamma_{\text{out}} / \gamma_{\text{in}} = [2/\pi] \cdot \Phi(f_N) \cdot \eta \quad (7)$$

由式(7)可知, 整体相机系统在乃奎斯特频率处的 MTF 为光学系统、CCD 探测器和成像电路三者在此频率处 MTF 的乘积。

下面, 进行整体相机系统在乃奎斯特频率处 CTF 的理论推导。

当采用透过率按方波规律变化的乃奎斯特频率靶标时, 经均匀光照射后, 透过靶标在光学系统入口处的光能分布函数可用式(8)表示:

$$z(x) = \alpha + \beta(1 + f(x)), \quad (8)$$

其中: $f(x)$ 为乃奎斯特频率的方波信号, 且可以展成傅里叶级数的形式, 如式(9)所示:

能分布函数如式(10)所示:

TDICCD 对光能采样后, 积分得到的能量最大值和最小值分别如式(11)和式(12)所示:

(13)所示:

CTF 的理论值如式(14)所示:

倍频率上的 MTF 皆有关, 但随着频率的升高其影响作用快速衰减。进一步展开得到式(15):

实际测试中, 从采集到的数值图像中可以得到 ζ_{out} 。而对于暗条纹遮挡良好的方波靶标, $\alpha \equiv 0$, 即 α 不随光照强度而变化, 所以输入靶标的对比度 $\zeta_{\text{in}} \equiv 1$, 所以有式(18)成立:

$$CTF_{\text{camera}}(f_N) = \zeta_{\text{out}}, \quad (18)$$

又由于存在如式(19)的不等式,

$$1 > \Phi(f_N) > \Phi(3f_N) > \Phi(5f_N) > \dots, \quad (19)$$

故有

$$\zeta_{\text{out}} < \left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot \Phi(f_N) \cdot \eta \cdot \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} = \left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot MTF_{\text{camera}}(f_N) \cdot \frac{\pi^2}{8}. \quad (20)$$

由式(16)和(20)得到式(21):

$$\frac{2}{\pi} \zeta_{\text{out}} < MTF_{\text{camera}}(f_N) < \frac{\pi}{4} \zeta_{\text{out}}. \quad (21)$$

在实际测试结果中,式(17)的补偿量中并非每一项都要考虑。可以看到当 $i > 2$ 之后,高频成分的系数呈二阶衰减。例如: $i=3$ 和 $i=4$ 时,

$$\left| -\frac{2}{\pi} \frac{\Phi[7f_N]}{7^2} \cdot \eta \right| < \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\Phi[7f_N]}{7^2} \ll \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{7^2} = 0.013, \quad (22)$$

$$\left| -\frac{2}{\pi} \frac{\Phi[9f_N]}{9^2} \cdot \eta \right| < \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\Phi[9f_N]}{9^2} \ll \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{9^2} = 0.008. \quad (23)$$

因此, $i > 2$ 的分量可忽略不计。而 $i=1$ 和 $i=2$ 时,分别有式(23)和式(24)成立。

$$\left| -\frac{2}{\pi} \frac{\Phi[3f_N]}{3^2} \cdot \eta \right| < \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\Phi[3f_N]}{3^2} < \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\Phi[f_N]}{3^2}, \quad (24)$$

$$\left| -\frac{2}{\pi} \frac{\Phi[5f_N]}{5^2} \cdot \eta \right| < \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\Phi[5f_N]}{5^2} < \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\Phi[f_N]}{5^2}. \quad (25)$$

因此在已知 $\Phi[3f_N]$ 和 $\Phi[5f_N]$ 时,可以根据式(17)计算出补偿量 ϵ ;

若只知道 $\Phi[f_N]$,则根据式(24)和式(25)有:

$$\epsilon > -\frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{3^2} + \frac{1}{5^2}\right) \cdot \Phi[f_N] \approx -0.096 \cdot \Phi[f_N], \quad (26)$$

将式(26)代入式(16)得到:

$$MTF_{\text{camera}}(f_N) > \frac{\pi}{4} \zeta_{\text{out}} - 0.096 \cdot \Phi[f_N]. \quad (27)$$

公式(27)即为空间光学相机在乃奎斯特频率下的 MTF。

3 测量实验

3.1 实验条件

基于第2节中的测量原理推导,依据图1的链路搭建了空间光学相机的 MTF 测试实验系统。将方波靶标(对应于相机乃奎斯特频率)安装于平行光管的焦面处,从而将靶标等效为无穷远

处目标;相机安放在真空罐中,调整平行光管使其光轴与相机光学系统的光轴重合;调整靶标,使得靶标条纹与 TDICCD 的推扫方向平行;用积分球输出的均匀光对靶标照明,通过光学系统和成像电子学系统得到靶标图像的灰度值,从而计算出数值图像中的靶标对比度,继而计算出整个系统的 MTF。

考虑到 $\alpha \approx 0$,因此积分球的光照强度对测量结果无明显影响;而目前的 TDICCD 均具备暗电平扣除功能,因此,TDICCD 的辐照度响应为过零点的一次曲线,不需要对偏置进行数字扣除。另外,系统的 MTF 测量中,还有一些因素影响测量结果的精度,其来源和解决途径如下:

(1)气流扰动。将相机整体安装于真空罐中能够有效隔离气流扰动,提高测量精度;

(2)靶标条纹与 TDICCD 像元的相位配准和测量过程中的横向振动干扰。将靶标分为若干组,组内为乃奎斯特频率,组间间距为 $1/n$ 倍的像元尺寸(n 越大越好)。这样,无论是在配准还是在有横向振动干扰时都能保证至少有一组像元是与靶标相位对齐的;

(3)横向振动对 TDICCD 采样的干扰。TDICCD 的多级积分特性使得其对横向振动十分敏感,因此易在高靶标亮度、低积分级数条件下进行空间光学相机的 MTF 测试。

(4)由于横向振动的干扰,数值图像中的任一黑条纹或白条纹(纵向)的灰度都不是稳定不变的。因此不可通过对多行求平均求得黑条纹和白条纹的灰度值来计算 MTF,而应采用其最值来计算。

(5)由于(4)中采用的是灰度最值,因此受成像电路信噪比的影响,成像电路的信噪比直接决定了 MTF 测试的精度,因此应该尽可能提高成像电路的信噪比,在不饱和的情况下提高靶标亮度,并采用 TDICCD 中的信噪比最高的通道来进行 MTF 测试。

3.2 实验结果

在 3.1 节的实验条件保障下进行整体相机的 MTF 测试。在实验用相机的光学系统和电子学系统组装之前,已经测得相机光学系统在乃奎斯特频率处的 MTF,故其为已知量,这里为 0.354。图2和图3分别为相机整体在 TDICCD 8级和16级时采集到的局部靶标图像。

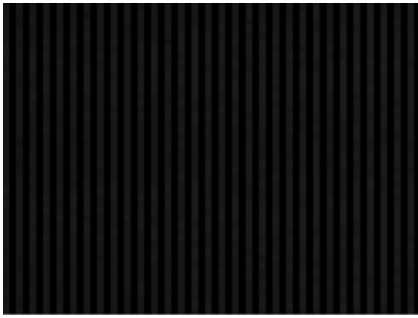


图 2 积分级数为 8 时空间光学相机采集的靶标图像

Fig. 2 Target image acquired at 8 integral grade

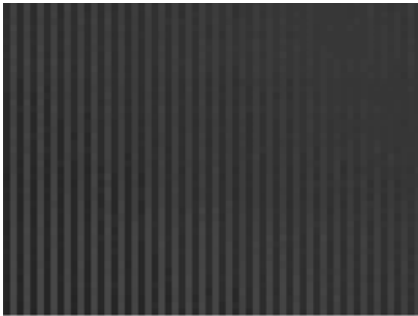


图 3 积分级数为 16 时空间光学相机采集的靶标图像

Fig. 3 Target image acquired at 16 integral grade

由图 3 可以看到,16 级下采集到的靶标有明显的模糊区域,该区域是受震动影响产生的。经计算,乃奎斯特频率处的测试结果如表 1 所示。

表 1 积分级数分别为 8 和 16 时的 $MTF_{camera}(f_N)$ Tab. 1 $MTF_{camera}(f_N)$ of camera at 8 and 16 integral grades

积分级数	ζ_{out}	$MTF_{camera}(f_N)$
8	0.305	0.206
16	0.262	0.172

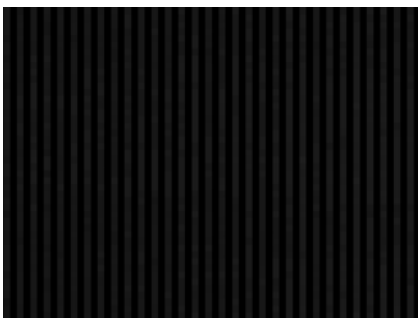


图 4 积分级数为 8 时空间相机在低照度下采集的靶标图像

Fig. 4 Target image acquired at low light intensity with 8 integral grade

图 4 和图 5 分别为相机在低照度和高照度下采集到的靶标图像的局部图。由于积分级数越低,测试结果越精确,所以选用 8 级积分级数。

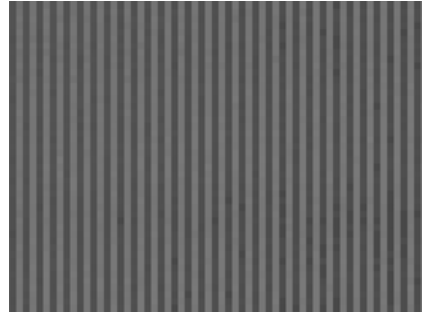


图 5 积分级数为 8 时空间相机在高照度下采集的靶标图像

Fig. 5 Target image acquired at high light intensity with 8 integral grade

乃奎斯特频率处的测试结果如表 2 所示。

表 2 积分级数为 8 时低照度和高照度的 $MTF_{camera}(f_N)$ Tab. 2 $MTF_{camera}(f_N)$ of camera at low and high light intensities with 8 integral grade

照度	ζ_{out}	$MTF_{camera}(f_N)$
低	0.299	0.201
高	0.314	0.213

考虑 3.1 节相关分析,采用 8 级下高照度的测试结果作为最终测试结果,以此计算出相机 TDICCD 及后续成像电路的总 MTF,如式 (28) 所示:

$$MTF_{CCD+circuit}(f_N) = [2/\pi] \cdot \eta =$$

$$MTF_{camera}(f_N) / \Phi(f_N) =$$

$$0.213 / 0.354 = 0.602. \quad (28)$$

已知 $\eta = 1$ 时, $MTF_{CCD+circuit}$ 的理论值为 0.636 6,这与 0.602 十分接近。此外,TDICCD 外围处理电路的 MTF 等效衰减系数 $\eta = 0.602 / (2/\pi) = 0.946$,接近 1。这均说明本方法的实测值与理论推导值对应较好。

4 结 论

本文对空间光学相机在乃奎斯特频率处 MTF 的测试方法进行了理论推导和深入分析,给出了相机在乃奎斯特频率处 MTF 的测试链路图。得到了乃奎斯特频率方波靶标在整个链路中

的传递过程和终端靶标图像的精确对比度函数模型,并且给出了终端靶标图像的对比度与相机在乃奎斯特频率处的MTF的转换关系和理论误差形式。最后,在真空环境下进行了相机在乃奎斯特频率下的MTF测试,并依据结论对结果进行了修正。实验结果表明:对于某空间光学相机,在

实验室条件下测得的乃奎斯特频率处的MTF为0.213,经折算TDICCD及处理电路的MTF为0.602,TDICCD外围处理电路的MTF等效衰减系数为0.946。上述结果表明本文方法基本准确,能够满足空间光学相机地面研制阶段的MTF测试要求。

参考文献:

- [1] 郭汉洲,吕恒毅,曲利新. 遥感相机动态调制传递函数与时间延迟积分CCD行周期误差的关系[J]. 光学精密工程,2013,21(8):2195-2200.
GUO H ZH, LV H Y, QU L X. Relation of line transfer period error and dynamic MTF of TDICCD in remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2195-2200. (in Chinese)
- [2] 杨永明,李清军,李文明,等. 基于Bayer滤波的彩色面阵CCD调制传递函数[J]. 光学精密工程,2012,20(7):1611-1618.
YANG Y M, LI Q J, LI W M, *et al.*. Modulation transfer function for color area CCD based on Bayer filtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1611-1618. (in Chinese)
- [3] 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):1204002-1-1204002-5.
NIE P, TIAN H Y, DONG B, *et al.*. Research of modulation transfer function measurement of CCD camera with rectangle target [J]. *ACTA OPTICA SINICA*, 2012,32(12):1204002-1-1204002-5. (in Chinese)
- [4] 杨秀彬,常琳,金光. 单框架控制力矩陀螺转子动不平衡对遥感卫星成像的影响[J]. 中国光学,2012,5(4):358-365.
YANG X B, CHANG L, JIN G. Influence of dynamic imbalance of SGCMG rotor on remote sensing satellite imaging [C]. *Chinese Optics*, 2012,5(4): 358-365. (in Chinese)
- [5] 李云飞,赵运隆. TDICCD相机成像系统地面检测设备设计[J]. 液晶与显示,2012,27(6):842-846.
LI Y F, ZHAO Y L. Design of ground test equipment for TDICCD camera imaging system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*,

- 2012,27(6):842-846. (in Chinese)
- [6] 杨秉新. 航天TDICCD相机静态调制传递函数的研究[J]. 航天返回与遥感,2004,25(3):22-24.
YANG B X. Research of static MTF for aerospace TDICCD camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2004, 25(3): 22-24. (in Chinese)
- [7] 王耀祥,田维坚,汪丽,等. 矩形波板法测量光锥与CCD耦合器件的光学传递函数[J]. 光子学报,2005,34(6):923-926.
WANG Y X, TIAN W J, WANG L, *et al.*. Measurement for modulation transfer function of CCD coupled with fiber optic taper by rectangle bar [J]. *ACTA PHOTONICA SINICA*, 2005,34(6):923-926. (in Chinese)
- [8] 曹海霞,巴音贺希格,崔继承,等. 基于图像复原的高光谱图像前向像移补偿[J]. 中国光学,2013,6(6):856-862.
CAO H X, BA Y H X G, CUI J CH, *et al.*. Forward image motion compensation of hyper spectral image based on image restoration [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(6):856-862. (in Chinese)
- [9] 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.
YANG H, JIAO W CH, ZHU Y H, *et al.*. Modulation transfer function of CCD camera at Nyquist frequency [J]. *ACTA OPTICA SINICA*, 2002,22(3):313-316. (in Chinese)
- [10] 沈凌云,郎百和,朱明,等. 数字直接制版系统的激光扫描成像设计[J]. 液晶与显示,2012,27(5):687-691.
SHEN L Y, LANG B H, ZHU M, *et al.*. Design of laser scanning imaging for digital computer-to-plate system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012,27(5):687-691. (in Chinese)

作者简介:



吕恒毅(1984—),男,辽宁大连人,博士研究生,助理研究员,2007年于大连理工大学获得学士学位,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事航天光学相机研制方面的工作。E-mail: lv_hengyi@163.com

导师简介:



韩诚山(1972—),男,辽宁盖县人,博士,研究员,博士生导师,1993年于吉林工业大学获得学士学位,1998年、2004年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事空间遥感技术的研究。E-mail: xuan_han@yahoo.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)