

文章编号:1007-2780(2015)05-0851-06

遥感相机静态调制传递函数的地面测试原理

吕恒毅*,李祥之,韩诚山,薛旭成

(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:为了在地面研制阶段精确地测试空间遥感相机在各种空间频率处的调制传递函数,对测试原理进行了理论推导和分析,并基于此开展了整机在各种空间频率处的传函测试实验。在给出了遥感相机调制传递函数的测试实验链路的基础上,推导了各种空间频率的正弦波和方波靶标在整个链路中的光能传递过程,从而得到了遥感相机在各种频率下的调制传递函数和对比度传递函数的理论形式,并证明了在任何频率处二者之间的转换系数均为 $\pi/4$ 。最后,在真空环境下进行了相机在 1、1/2 和 1/3 乃奎斯特频率下的调制传递函数测试。实验结果表明:某空间遥感相机在实验室条件下测得的 1、1/2 和 1/3 乃奎斯特频率下调制传递函数分别为 0.21、0.40 和 0.59。经计算光学系统反推传函与设计传函衰减系数接近 1,证明了方法的正确性。

关键词:遥感;调制传递函数;测量;时间延时积分电荷耦合器件

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20153005.0851

Principle of static modulation transfer function measurement for remote sensing cameras

LV Heng-yi*, LI Xiang-zhi, HAN Cheng-shan, XUE Xu-cheng

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

Abstract: In order to precisely measure the modulation transfer function of the space camera at any frequency before launching, the measuring method is elaborated and some experiments are carried out. On the basis of giving the schematic diagram of modulation transfer function measurement, the transfer process of a sinusoidal and a square wave at any frequency are investigated. Consequently, the modulation transfer function and the contrast transfer function are derived, based on which the conversion coefficient of them is obtained as $\pi/4$ at any frequency. Finally, an experiment is implemented and the modulation transfer functions at 1, 1/2 and 1/3 Nyquist frequency are measured based on a certain remote sensing camera. The experiment result indicates that the modulation transfer functions at 1, 1/2 and 1/3 Nyquist frequency of the remote sensing camera used are 0.21, 0.40 and 0.59 at lab condition. Moreover, the reduction between the optical system modulation transfer function calculated on account of test results and the design value is near 1, which proves our derivation in this paper.

Key words: remote sensing; modulation transfer function; measurement; TDI CCD

收稿日期:2014-08-21;修订日期:2014-11-18.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61036015);吉林省青年科研基金(No. 20150520059JH)

* 通信联系人,E-mail:lv_hengyi@163.com

1 引言

光学系统的调制传递函数(MTF)^[1-2]能够客观地评价成像质量,并且从根本上克服了几何像差、星点、分辨率等传统评价途径的不足。目前,在空间遥感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^[3]已成为相机交付前必须检测的重要指标之一。除此之外,考虑到地面场景中含有大量的次高频和中低频信息,相机系统在其他频率处的调制传递函数也被广泛关注。空间遥感相机通常由光学系统、结构支撑系统、时间延时积分电荷耦合器件(TDIC-CD)^[4-5]和相关电路几部分组成。其中,TDICCD对光能量的空间采样过程^[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。整体相机系统在某频率处的MTF以如下定义形式给出:相机对某频率的正弦靶标成像,靶标图形与探测器像元按指定的相位对齐时,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靶标不易得到,因此通常采用方波靶标进行对比度传递函数(CTF)^[7-10]测试,并对结果进行转换和修正得到系统在该频率处的MTF值。目前,遥感相机在乃奎斯特频率处的MTF测试方法已经相对成熟,文章[3]和[9]已经给出了详细的测试设备、方法和分析。但相机系统在其他频率(例如: $f_{Nyquist}/2, f_{Nyquist}/3, f_{Nyquist}/4, \cdots$)处的MTF测试属于过采样,CTF计算参数的选择、CTF和MTF的转换关系目前鲜见报道。本文将对任意频率的方波信号在相机的各环节中的传递形式进行讨论和推导,并基于此导出空间遥感相机在各频率处的CTF和MTF的精确关系,从而实现相机系统在各频率处的MTF精确测量。

2 遥感相机在各频率处MTF测试原理

2.1 MTF测试链路的构成

图1为遥感相机的调制传递函数测试系统示意框图。

其中,积分球用于提供均匀白光;平行光管用

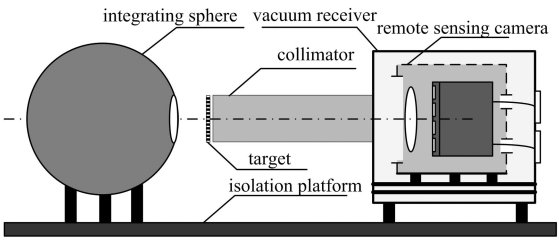


图1 遥感相机MTF测试链路图
Fig. 1 MTF measuring schematic diagram for remote sensing camera

于将靶标投射至等效无穷远处;而真空罐用来隔绝气流扰动,提高测量精度,同时能够模拟相机在卫星上成像的过程。

2.2 测试原理

目前,空间遥感相机大多为采用TDICCD的推扫式相机。对相机的调制传递函数测试,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)的静态调制传递函数进行测试。

首先,进行整体相机系统在任意频率处(本文只针对整数倍分之一的乃奎斯特频率)的MTF的理论推导。

2.1.1 相机在各频率处的MTF推导

当采用透过率按正弦规律变化的频率为 f_N/i 的靶标时(其中 f_N 为乃奎斯特频率, i 为正整数),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。

$$y_i(x) = \alpha + \beta[1 + \sin(2\pi(f_N/i)x)], \quad (1)$$

其中: α 为偏置, β 为振幅。可知该函数的调制度为式(2)所示。

$$\gamma_{in} = \beta/(\alpha + \beta), \quad (2)$$

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。

$$\lambda_i(x) = \alpha + \beta[1 + \Phi(f_N/i) \cdot \sin(2\pi(f_N/i)x)], \quad (3)$$

其中: $\Phi(f_N/i)$ 为相机光学系统在 f_N/i 频率处的MTF。TDICCD对其接收面上的光照进行积分采样。由于 i 为奇数和偶数时,MTF测试中像元和靶标的相位关系要求有所不同,因此分类讨论。

当 i 为奇数时,积分得到的单像素能量最大值和最小值分别如式(4)和式(5)所示。

$$E_{max}^{odd} = \int_{\frac{(k-1)d}{2}}^{\frac{(k+1)d}{2}} \lambda_i(x) \cdot dx =$$

$$(\alpha + \beta) \cdot d + 2\beta \cdot \frac{i \cdot d}{\pi} \cdot \Phi\left(\frac{f_N}{i}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2i}\right), \quad (4)$$

$$E_{\min}^{\text{odd}} = \int_{\frac{(k-1)d}{2}}^{\frac{(k+1)d}{2}} \lambda_i(x) \cdot dx =$$

$$(\alpha + \beta) \cdot d - 2\beta \cdot \frac{i \cdot d}{\pi} \cdot \Phi\left(\frac{f_N}{i}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2i}\right), \quad (5)$$

其中, $E_{\max}^{\text{odd}}$ 为 TDICCD 的单像素积分能量最大值, $E_{\min}^{\text{odd}}$ 为 TDICCD 的单像素积分能量最小值, 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的数值图像的调制度为式(6)所示。

$$\gamma_{\text{out}}^{\text{odd}} = \frac{E_{\max}^{\text{odd}} - E_{\min}^{\text{odd}}}{E_{\max}^{\text{odd}} + E_{\min}^{\text{odd}}} = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \cdot \Phi\left(\frac{f_N}{i}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi}{2i}\right), \quad (6)$$

由式(6)可以看出, $\text{sinc}(\pi/2i)$ 为 TDICCD 在 f_N/i 频率处的采样 MTF。因此, 空间遥感相机在 f_N/i 频率处的 MTF 的理论值如式(7)所示。

$$\text{MTF}_{\text{camera}}\left(\frac{f_N}{i}\right) = \frac{\gamma_{\text{out}}^{\text{odd}}}{\gamma_{\text{in}}} = \Phi\left(\frac{f_N}{i}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi}{2i}\right). \quad (7)$$

当 i 为偶数时, 积分得到的单像素能量最大值和最小值分别如式(8)和式(9)所示。

$$E_{\max}^{\text{even}} = \int_{\frac{k}{2} \cdot d - \frac{d}{2}}^{\left(\frac{k}{2} + 1\right) \cdot d - \frac{d}{2}} \lambda_i(x) \cdot dx =$$

$$(\alpha + \beta) \cdot d + 2\beta \cdot \frac{i \cdot d}{\pi} \cdot \Phi\left(\frac{f_N}{i}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2i}\right), \quad (8)$$

$$E_{\min}^{\text{even}} = \int_{\left(\frac{3k}{2} - 1\right) \cdot d + \frac{1}{2}d}^{\frac{3k}{2} \cdot d + \frac{1}{2}d} \lambda_i(x) \cdot dx =$$

$$(\alpha + \beta) \cdot d - 2\beta \cdot \frac{i \cdot d}{\pi} \cdot \Phi\left(\frac{f_N}{i}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2i}\right). \quad (9)$$

同理可得, i 为偶数时经处理电路后输出的数值图像的调制度为式(10)所示。

$$\gamma_{\text{out}}^{\text{even}} = \frac{E_{\max}^{\text{even}} - E_{\min}^{\text{even}}}{E_{\max}^{\text{even}} + E_{\min}^{\text{even}}} = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \cdot \Phi\left(\frac{f_N}{i}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi}{2i}\right) \quad (10)$$

因此, 空间遥感相机在 f_N/i 频率处的 MTF 的理论值如式(11)所示。

$$\text{MTF}_{\text{camera}}\left(\frac{f_N}{i}\right) = \frac{\gamma_{\text{out}}^{\text{even}}}{\gamma_{\text{in}}} = \Phi\left(\frac{f_N}{i}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi}{2i}\right) \quad (11)$$

综上所述可知, 无论 i 为奇数或偶数, 相机整体在 f_N/i 频率处的 MTF 公式均为式(11)所示。

2.1.2 相机 CTF 推导及与 MTF 的关系

当采用透过率按方波规律变化的 f_N/i 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(12)表示。

$$z_i(x) = \alpha + \beta(1 + f_i(x)), \quad (12)$$

其中, $f_i(x)$ 为 f_N/i 频率的方波信号, 且可以展成傅里叶级数的形式, 如式(13)所示。

$$f_i(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{2k-1} \cdot \cos\left[2\pi(2k-1) \cdot \frac{f_N}{i} \cdot x\right]. \quad (13)$$

经过光学系统后, 在 TDICCD 像面处的光能分布函数为式(14)所示。

$$\eta_i(x) = \alpha + \beta \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{2k-1} \cdot \Phi\left[(2k-1) \cdot \frac{f_N}{i}\right] \cdot \cos\left[2\pi(2k-1) \cdot \frac{f_N}{i} x\right] \right\}. \quad (14)$$

TDICCD 对其接收面上的光照进行积分采样, 但在测试过程中同样必须考虑像元与靶标的相位关系。

当 i 为奇数时, 积分得到的单像素能量最大值和最小值分别如式(15)和式(16)所示。

$$\Gamma_{\max} = \int_{-d/2}^{d/2} \eta_i(x) \cdot dx =$$

$$(\alpha + \beta) \cdot d + \beta \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^{+\infty} \Phi\left[(2k-1) \cdot \frac{f_N}{i}\right] \cdot \frac{(-1)^{k+1}}{(2k-1)} \cdot \frac{i}{(2k-1) \cdot \pi \cdot f_N} \cdot \sin\left[\frac{(2k-1) \cdot \pi}{2i}\right], \quad (15)$$

$$\Gamma_{\min} = \int_{\frac{d}{2} + (i-1)d}^{\frac{3d}{2} + (i-1)d} \eta_i(x) \cdot dx =$$

$$(\alpha + \beta) \cdot d + \beta \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^{+\infty} \Phi\left[(2k-1) \cdot \frac{f_N}{i}\right] \cdot \frac{(-1)^k}{(2k-1)} \cdot \frac{i}{(2k-1) \cdot \pi \cdot f_N} \cdot \sin\left[\frac{(2k-1) \cdot \pi}{2i}\right]. \quad (16)$$

则经过成像电路后的数值图像的对比如为式(17)所示。

$$\zeta_{\text{out}} = \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta}\right) \cdot \left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot \sum_{k=1}^{+\infty} \Phi\left[(2k-1) \cdot \frac{f_N}{i}\right] \cdot \frac{(-1)^{k+1}}{(2k-1)} \cdot \text{sinc}\left[\frac{(2k-1) \cdot \pi}{2i}\right] \approx \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta}\right) \cdot \left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot \Phi\left(\frac{f_N}{i}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi}{2i}\right). \quad (17)$$

所以, 空间遥感相机在 f_N/i 频率处的 CTF

的理论值如式(18)所示。

$$\begin{aligned} \text{CTF}_{\text{camera}}\left(\frac{f_N}{i}\right) &= \frac{\zeta_{\text{out}}}{\zeta_{\text{in}}} \approx \\ &\left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot \Phi\left(\frac{f_N}{i}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi}{2i}\right) = \\ &\left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot \text{MTF}_{\text{camera}}\left(\frac{f_N}{i}\right), \end{aligned} \quad (18)$$

从而得到式(19)。

$$\text{MTF}_{\text{camera}}\left(\frac{f_N}{i}\right) \approx \frac{\pi}{4} \cdot \text{CTF}_{\text{camera}}\left(\frac{f_N}{i}\right). \quad (19)$$

同理可以推导, i 为偶数时也有上述式(18)和(19)成立。

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(20)成立。

$$\text{CTF}_{\text{camera}}\left(\frac{f_N}{i}\right) = \zeta_{\text{out}}, \quad (20)$$

由式(19)有

$$\text{MTF}_{\text{camera}}\left(\frac{f_N}{i}\right) = \frac{\pi}{4} \cdot \zeta_{\text{out}}. \quad (21)$$

以上便是空间遥感相机在 f_N/i 频率处的调制传递函数测量原理的推导过程。可见,调整系数 $\pi/4$ 不仅在乃奎斯特频率处适用,在其他频率处也适用。

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 的链路搭建了空间遥感相机在各频率处的调制传递函数测试实验系统。将方波靶标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调制传递函数。

考虑到 $\alpha \equiv 0$, 因此积分球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,

系统的调制传递函数测量中,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 f_N/i 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)的灰度不是稳定不变的。不可通过对多行求平均的办法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计算,因此受成像电路的信噪比影响,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的亮度,并采用 TDICCD 中的信噪比最高的通道来进行 MTF 测试。

在完成了上述实验条件的调整后,便可以开始空间光学相机在 f_N/i 频率处的调制传递函数测试。

3.2 实验结果

在 3.1 节的实验条件保障下进行遥感相机的地面传函测试。为满足实验要求,制作了 f_N 频率、 $f_N/2$ 频率和 $f_N/3$ 频率的靶标进行传函测试,并得

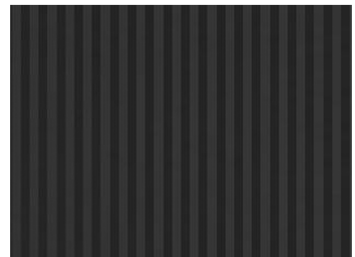


图 2 遥感相机在乃奎斯特频率方波靶标下采集的图像
Fig. 2 Image acquired by remote sensing camera at Nyquist frequency with square wave target

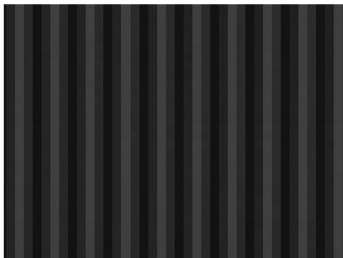


图 3 遥感相机在 1/2 乃奎斯特频率方波靶标下采集的图像

Fig. 3 Image acquired by remote sensing camera at 1/2 Nyquist frequency with square wave target

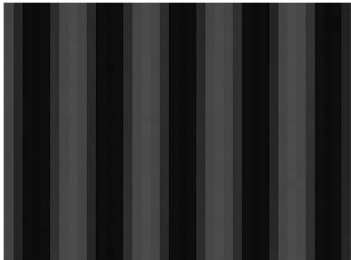


图 4 遥感相机在 1/3 乃奎斯特频率方波靶标下采集的图像

Fig. 4 Image acquired by remote sensing camera at 1/3 Nyquist frequency with square wave target

到了相应的数值图像分别如图 2、图 3 和图 4 所示。

从采集到的数值图像可计算出各靶标频率下输出图像中靶条的对比度值,依据式(21)可以计算出相机整体在各频率处的 MTF 值,通过式(7)可反推出光学系统在对应频率处的调制传递函数,并与光学系统设计进行比较,如表 1 所示。

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 Z, 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.

表 1 相机在各频率处 MTF 测试值表					
Tab. 1 MTF of camera at different frequency					
f_N/i	ζ_{out}	MTF _{相机}	$\Phi(f_N/i)_{backstep}$	$\Phi(f_N/i)_{degisn}$	reduction
f_N	0.26	0.21	0.32	0.34	0.94
$f_N/2$	0.51	0.40	0.45	0.47	0.96
$f_N/3$	0.72	0.56	0.59	0.63	0.94

由表 1 可以看出,通过计算反推出的光学传函值与其理论设计值的衰减系数不大,之所以有所衰减是因为光学加工、装校、机械支撑中存在误差以及成像电子学系统的各环节带宽限制。这也证实了本文推导的正确性。同时,积分球光源的均匀性和稳定性、靶标的几何制造误差、平台的稳定性和相机调焦的精确性也是测量的重要误差来源。

4 结 论

本文基于对空间遥感相机在各种空间频率处的调制传递函数测试的需求,对测试方法进行了理论推导和分析,并开展了传函测试实验。推导遥感相机的各种频率下的调制传递函数和对比度传递函数的理论函数形式,并证明了二者之间的转换系数为 $\pi/4$ 。在真空环境下进行了相机的 1、1/2 和 1/3 乃奎斯特频率下的调制传递函数测试。实验结果表明:某空间遥感相机在实验室条件下测得的 1、1/2 和 1/3 乃奎斯特频率下调制传递函数分别为为 0.21、0.40 和 0.59。经计算反推出的光学系统传函与其理论设计值的衰减系数接近 1,证明了本文推导的正确性。

- Nie P, Tian H Y, Dong B, *et al.* Research of modulation transfer function measurement of CCD camera with rectangle target [J]. *Acta Optical Sinica*, 2012,32(12):1204002-1-1204002-5. (in Chinese)
- [4] 薛旭成,韩诚山,薛栋林,等.应用双排TDICCD提高空间推扫遥感相机动态范围[J].光学精密工程,2012,20(12):2791-2795.
- Xue X C, Han C S, Xue D L, *et al.* Increasing dynamic range of space push-broom remote sensing camera by two-row TDI CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2791-2795. (in Chinese)
- [5] 于涛,宋克非.TDI-CCD高分辨率空间相机多功能调焦控制系统[J].红外与激光工程,2013,42(S2):363-367.
- Yu T, Song K F. Multi-function focus control system for TDI-CCD high resolution space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013,42(S2): 363-367. (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 Y, 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 Sinic*, 2005,34(6): 923-926. (in Chinese)
- [8] 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):0711001-1-0711001-5.
- Xu W W, Zhang L M, Yang B Y, *et al.* On-orbit MTF measurement of high resolution satellite optical camera using periodic target [J]. *Acta Optical Sinica*, 2011,31(7):0711001-1-0711001-5. (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 C, Zhu Y H, *et al.* Modulation transfer function of CCD camera at Nyquist frequency [J]. *Acta Optical Sinica*, 2002,22(3):313-316. (in Chinese)
- [10] 万春明,佟首峰.CCD相机调制传递函数的测试原理分析[J].半导体光电,2002,23(1):40-43.
- Wan C M, Tong S F. Analysis on testing principle for modulation transfer function of CCD camera [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002,23(1):40-43. (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的研制方面工作。E-mail: lv_hengyi@163.com

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年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位,主要从事空间相机自动控制技术的研究。E-mail: xuan_han@yahoo.com.cn

薛旭成(1980—),男,河北阳原人,副研究员,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为光电成像及处理技术。E-mail: xue0818@163.com