

文章编号: 1003-501X(2010)12-0011-06

卫星振动对 TDICCD 成像质量的影响及补偿方法

石俊霞^{1,2}, 薛旭成¹, 郭永飞¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了对卫星振动图像进行稳像处理, 分析了卫星振动对时间延时积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)成像质量的影响, 提出了一种对卫星振动进行补偿的方法。首先介绍了 TDICCD 的工作原理及其对振动的敏感性, 然后以调制传递函数(MTF)为评价标准研究了振动对 TDICCD 成像质量的影响, 重点分析了 TDICCD 积分级数与振动的关系。通过对卫星振动数据的具体计算表明, TDICCD 的积分级数越大, 卫星振动对成像质量的影响越严重。当 TDICCD 积分级数大于或等于 54 时, MTF 值已下降到 95%以下。根据分析结果, 提出了基于快速 CCD 的卫星振动检测方法和基于振镜的卫星振动补偿方法来补偿卫星振动对 TDICCD 成像质量的影响。在卫星振动检测技术中, 提出了一种改进的灰度投影算法来检测卫星振动参量, 检测误差不超过 0.5 个像素。

关键词: 稳像; 卫星振动; TDICCD; 调制传递函数; 灰度投影算法

中图分类号: V445.8

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.12.003

Effect of Satellite Vibration on Imaging Quality of TDICCD Camera and Compensation Method

SHI Jun-xia^{1,2}, XUE Xu-cheng¹, GUO Yong-fei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to realize image stabilization on vibrated image captured by an airborne TDICCD, the effect of satellite vibration on imaging quality of TDICCD is analyzed, and a method on compensation to satellite vibration is proposed. First, the principle of a TDICCD is introduced, and the characteristic that a TDICCD differs from others is that a TDICCD is especially sensitive to vibration. Then, the effect of vibration on a TDICCD camera is analyzed by taking the MTF as an evaluation standard. As an emphasis, the relationship between vibration and TDICCD integration stage is researched. Finally, by using the satellite vibration data, the effect of satellite vibration on TDICCD is calculated. Results indicate that as the integration stage increases, MTF decreases greatly. When the integration stage increases to 54, the MTF decreases to below 0.95. Based on the analysis, vibration detecting method based on high-speed CCD and vibration compensating method based on vibration mirror are proposed to compensate the influence of satellite vibration. Aimed at the former, an improved gray projection algorithm is proposed to detect the parameters of satellite vibration, and the error is not more than half a pixel.

Key words: image stabilization; satellite vibration; TDICCD; modulation transfer function; gray projection algorithm

0 引言

TDICCD 是一种以特殊方式工作的线阵 CCD, 它通过多级时间积分来延长积分曝光时间, 不仅大大提

收稿日期: 2010-07-14; 收到修改稿日期: 2010-08-30

基金项目: 中科院重大科研装备研制项目

作者简介: 石俊霞(1984-), 女(汉族), 内蒙古人。博士研究生, 主要研究方向为光电成像及电子稳像技术。E-mail: 19031121@163.com。

高了光通量, 而且提高了相机的灵敏度和信噪比, 降低了光能量对相机相对孔径的要求, 有利于降低重量和成本。与同样的线阵 CCD 相机相比, 由于 N 级积分的 TDICCD 相机的光能量利用率可提高 N 倍, 信噪比可提高 \sqrt{N} 倍, 因此 TDICCD 在暗视场下成像有很大优势, 在高分辨航天相机中具有广泛的应用。

TDICCD 正常工作的基本前提是光生电荷包的转移与焦平面上的图像转移速度完全同步, 任何的匹配误差都将导致图像的模糊。卫星在轨工作期间, 由于卫星平台和空间环境的振动会引起相机的抖动, 虽然卫星上已采取一定的减振措施, 但仍有一部分小幅值的振动无法消除, 从而影响相机的成像质量, 造成图像模糊^[1-2]。

针对这个问题, Ofer Hadar 等人从振动对光学传递函数影响的角度出发, 进行了大量的试验^[3-4], 但并未考虑 TDICCD 的特殊性, 且试验中的振动参数与卫星实际的振动参数差别较大。陈丁跃等人从机械减振的角度分析了振动对光学系统的影响^[5]。二者均难以从像质角度为 TDICCD 相机的稳像工作提供确凿的理论依据。在图像复原领域, 大都是根据被模糊的图像估计运动的点扩散函数^[6-7], 这些方法受噪声影响大, 而且只能识别有限的运动形式, 如匀速直线运动, 而卫星的振动形式比较复杂, 这些方法的适用性受到限制。文献[8]提出一种通过光束测量振动的方法, 但该方法适合地面测量, 而无法在星上实施。Oren Haik 等人利用 TDICCD 交错排列的结构来实现 TDICCD 相机图像的超分辨率重构^[9], 但大多数相机并不采用这种结构。Jiagu Wu 等人提出了一种 TDICCD 相机振动图像复原的方法^[10], 但文中假设振动参数是已知的。

本文从稳像的角度出发, 分析了振动对航天 TDICCD 相机成像质量的影响, 并根据 NASA/GSFC 提供的 LANDSAT-4 的振动数据计算了卫星平台振动对 TDICCD 相机的 MTF 影响, 并重点研究了存在振动时 TDICCD 积分级数与 MTF 之间的关系。根据分析结果提出了通过快速 CCD 获取振动参量的振动检测技术和基于振镜的振动补偿措施, 来提高高分辨率 TDICCD 相机的成像质量。另外, 本文提出了一种改进的灰度投影算法并将其应用于 TDICCD 相机的振动参数检测中。

1 振动对 TDICCD 相机像质的影响

任何形式的振动都可以分解为若干正弦振动的叠加, 因此下面主要分析正弦振动对 TDICCD 相机像质的影响。为了计算振动图像的调制传递函数, 首先需得到像面的光学亮度函数。对于正弦亮度^[11]:

$$i(x) = B_0 + B_m \cos 2\pi f x(t) \quad (1)$$

式中: f 为空间频率, $x(t)$ 为 x 方向上的运动函数, B_0 、 B_m 是常数。因此没有振动时图像的调制对比度为

$$MC_0 = B_m / B_0 \quad (2)$$

设正弦振动方程为 $x(t) = x_0 + D \cos(2\pi t / T_0)$, 其中 T_0 为正弦振动的周期, 像面的光学亮度函数为式(1)所描述的正弦亮度分布, 曝光开始时刻设为 t_x , 曝光时间为 t_e , 则:

$$\overline{i(x, t)} = \frac{1}{t_e} \int_{t_x}^{t_x+t_e} [B_0 + B_m \cos 2\pi f (x_0 + D \cos \frac{2\pi t}{T_0})] dt \quad (3)$$

令 $2\pi t / T_0 = \varphi$, 则 $t = T_0 \varphi / (2\pi)$, 假设 TDI CCD 工作在 N 级积分级数下, 则:

$$\begin{aligned} \overline{i(x, t)} &= B_0 + B_m \cos(2\pi f x_0) \frac{T_0}{2\pi} \frac{1}{N t_e} \int_{2\pi t_x / T_0}^{2\pi(N t_e + t_x) / T_0} \cos(2\pi f D \cos \varphi) d\varphi - \\ &\quad B_m \sin(2\pi f x_0) \frac{T_0}{2\pi} \frac{1}{N t_e} \int_{2\pi t_x / T_0}^{2\pi(N t_e + t_x) / T_0} \sin(2\pi f D \cos \varphi) d\varphi \\ \text{令 } \frac{T_0}{2\pi} \frac{1}{N t_e} \int_{2\pi t_x / T_0}^{2\pi(N t_e + t_x) / T_0} \cos(2\pi f D \cos \varphi) d\varphi &= P, \quad \frac{T_0}{2\pi} \frac{1}{N t_e} \int_{2\pi t_x / T_0}^{2\pi(N t_e + t_x) / T_0} \sin(2\pi f D \cos \varphi) d\varphi = Q, \text{ 则:} \\ \overline{i(x, t)} &= B_0 + B_m \cos(2\pi f x_0) P - B_m \sin(2\pi f x_0) Q = B_0 + B_m \sqrt{P^2 + Q^2} \cos(2\pi f x_0 - \theta) \end{aligned}$$

其中 $\theta = \arctan(Q / P)$ 。此时 $MC_i = (B_m / B_0) \sqrt{P^2 + Q^2}$, 所以

$$MTF = MCF = MC_i / MC_0 = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

式(4)为正弦振动 MTF 的通用计算公式。引入零阶贝塞尔函数 $J_0(x) = (1/\pi) \int_0^\pi \cos(x \sin \varphi) d\varphi$ 及

$(1/\pi)\int_0^\pi \sin(x \cos \varphi) d\varphi = 0$, 且考虑到 $f(x) = \cos(x \sin \varphi)$ 和 $g(x) = \sin(x \cos \varphi)$ 都是周期为 π 的周期函数, 因而, 若 $2\pi(Nt_e + t_x)/T_0 - 2\pi t_x/T_0 = 2\pi Nt_e/T_0 = k\pi$ (k 为正整数), 即 $t_e = kT_0/(2N)$, 则:

$$\overline{i(x, t)} = B_0 + B_m \cos(2\pi f x_0) J_0(2\pi f D)$$

此时 $MC_i = (B_m/B_0)J_0(2\pi f D)$ 。因此

$$MTF = MCF = MC_i / MC_0 = J_0(2\pi f D) \quad (5)$$

由式(5)可知, 当 $t_e = kT_0/(2N)$ 时, 正弦振动的调制传递函数与开始曝光时间无关, 只取决于正弦振动的振幅, 随着振幅 D 的增加, MTF 下降, 图像质量变差。

通过以上分析可知, 对于 TDICCD, 当其积分级数改变时, 积分时间发生变化, 因而不能简单的将正弦振动划分为高频振动和低频振动。因为当改变积分级数时, t_e/T_0 的值会发生很大的改变。

2 卫星平台振动分析与计算

卫星振动可分为滚动轴、俯仰轴和偏航轴三个方向的振动^[12]。

滚动轴方向的振动会在垂直 TDI 方向产生位移, 位移大小与相机焦距有关, 设相机焦距为 f' , 滚动轴方向角振幅为 θ_1 , 则在一个行积分时间内垂直 TDI 方向产生的位移幅值为 $f' \tan \theta_1$ 。

俯仰轴方向的振动会在沿 TDI 方向产生位移, 位移大小与相机焦距有关, 设相机焦距为 f' , 俯仰轴方向角振幅为 θ_2 , 则在一个行积分时间内沿 TDI 方向产生的位移幅值为 $f' \tan \theta_2$ 。

偏航轴方向的振动既会在沿 TDI 方向产生位移, 也会在垂直 TDI 方向产生位移, 位移大小与 TDICCD 像元尺寸有关, 设 TDICCD 像元尺寸为 a , 偏航轴方向角振幅为 θ_3 , 则在一个行积分时间内沿 TDI 方向产生的位移幅值为 $a(1 - \cos \theta_3)$, 在垂直 TDI 方向产生的位移幅值为 $a \sin \theta_3$ 。

由 NASA/GSFC 提供的 LANDSAT-4 的振动数据表明, 卫星平台的振动主要源于太阳能电池阵列驱动所产生的频率为 1 Hz, 振幅为 100 μrad 的振动和由卫星上反作用轮基波和二次谐波所产生的频率及振幅各为 100 Hz、4 μrad 和 200 Hz、0.6 μrad 的振动^[13]。

假设相机焦距 $f' = 6 \text{ m}$, TDICCD 像元尺寸为 $a = 10 \mu\text{m}$, 行积分时间 $t_e = 50 \mu\text{s}$, 则卫星平台振动数据如表 1~3 所示。

表 1 滚动轴方向振动数据

Table 1 Vibration data of scroll axis

Frequency/Hz	1	100	200
Amplitude / μrad	100	4	0.6
Displacement along TDI direction / μm	0	0	0
Displacement vertical to TDI direction / μm	100	4	0.6

表 2 俯仰轴方向振动数据

Table 2 Vibration data of pitching axis

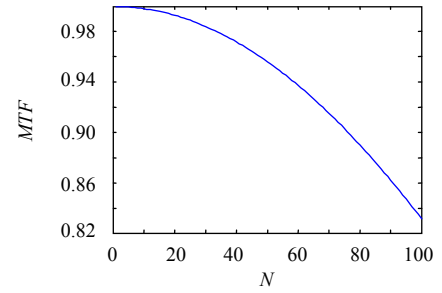
Frequency/Hz	1	100	200
Amplitude / μrad	100	4	0.6
Displacement along TDI direction / μm	100	4	0.6
Displacement vertical to TDI direction / μm	0	0	0

表 3 偏航轴方向振动数据

Table 3 Vibration data of yawing axis

Frequency/Hz	1	100	200
Amplitude / μrad	100	4	0.6
Displacement along TDI direction / μm	5.0×10^{-8}	8.0×10^{-11}	1.8×10^{-12}
Displacement vertical to TDI direction / μm	10.0×10^{-4}	4.0×10^{-5}	6.0×10^{-6}

由表 1、表 2 和表 3 数据可以看出, 偏航轴方向振动导致的位移远小于滚动轴和俯仰轴方向振动导致的位移值, 在进行后续图像的稳像时, 需保证最大振动位移时的图像分辨率, 因此以滚动轴方向为例, 分析卫星平台振动对调制传递函数的影响。图 1 所示为表 1 对应数据下垂直 TDI 方向振动的 MTF 值随积分级数的变化关系曲线。由图 1 可以看出, 当积分级数增加到 54 时, MTF 值已下降至低于 95%。结果表明: 卫星振动对航天 TDICCD 相机像质的影响很大, 为了发挥航天相机的高分辨特性, 稳像补偿技术具有重要意义。

图 1 滚动轴方向的 MTF Fig.1 MTF of scroll axis

3 卫星振动的稳像补偿技术

卫星振动的稳像补偿包括两个步骤, 即振动检测和振动补偿。

3.1 振动检测技术

如图 2 所示, 卫星振动参数的检测是通过快速面阵 CCD 来实现的。为了扩大视场, 目前遥感相机大都采用 TDICCD 拼接技术, 而快速面阵 CCD 可安装在同一直线上的两个 TDICCD 之间。

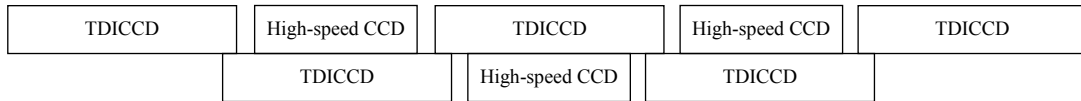


图 2 卫星振动检测装置

Fig.2 Satellite vibration detecting equipment

在 TDICCD 曝光时间内, 由于卫星的振动导致得到的图像被模糊了, 而快速面阵 CCD 由于曝光时间很短, 可以认为在曝光时间内没有相对运动, 因此快速面阵 CCD 得到的图像序列是清晰的。利用这些清晰的图像序列来计算他们之间的相对位移, 从而可以得到位移与时间曲线, 即求得卫星的振动参量。本文采用改进的灰度投影算法来检测快速面阵 CCD 图像序列间的位移值。灰度投影算法^[14]的基本原理如下。

将每一帧待处理的二维图像映射为两个独立的一维波形, 第 k 帧图像的行列投影公式为

$$G_k(j) = \sum_i G_k(i, j), \quad G_k(i) = \sum_j G_k(i, j) \quad (6)$$

式中: $G_k(j)$ 、 $G_k(i)$ 分别为第 k 帧图像中第 j 列第 i 行的灰度投影值; $G_k(i, j)$ 为 (i, j) 位置处图像的灰度值。将第 k 帧图像的、列灰度投影曲线与参考帧图像的、列灰度投影曲线做互相关运算, 根据两条相关曲线的波谷值即可确定当前帧图像相对参考帧图像的、列位移矢量。估计水平和垂直方向位移矢量的相关运算公式为

$$C(\omega_h) = \sum_{j=1}^{N-2n} [G_r(j + \omega_h - 1) - G_k(n + j)]^2, \quad C(\omega_v) = \sum_{i=1}^{M-2m} [G_r(i + \omega_v - 1) - G_k(m + i)]^2 \quad (7)$$

式中: $G_r(j)$ 和 $G_k(j)$ 分别为参考帧图像第 j 列和第 k 帧图像的第 j 列的灰度投影值; $G_r(i)$ 和 $G_k(i)$ 分别为参考帧图像第 i 行和第 k 帧图像第 i 行的灰度投影值; N 和 M 为列数和行数; n 和 m 分别为水平方向和垂直方向位移探测在一侧的搜索度。设 ω_{hmin} 和 ω_{vmin} 分别为 $C(\omega_h)$ 、 $C(\omega_v)$ 取最小时 ω_h 和 ω_v 的值, 则第 k 帧图像相对于参考图像在水平和垂直方向的像移矢量为

$$\Delta x = n + 1 - \omega_{hmin}, \quad \Delta y = m + 1 - \omega_{vmin} \quad (8)$$

以上算法需要在搜索区内逐点做相关运算, 计算量大。为了减少数据量, 提高计算速度, 本文提出一种改进的灰度投影算法, 利用相关曲线的单峰性缩小搜索区间, 但考虑到相关曲线在峰值两侧是不对称的, 因此本文选择搜索区间中心点及其相邻两点进行相关运算。下面以水平方向投影为例将该算法描述如下:

- 1) 初始化搜索区间 $[0, 2n]$, 则中心点为 $c=n$, 记 $a=0$, $b=2n$;
- 2) 分别计算中心点及其相邻左右两点的相关函数值: $C_c = C(c)$ 、 $C_l = C(c-1)$ 和 $C_r = C(c+1)$;

3) 比较 C_c 、 C_l 和 C_r 的值, 如果 C_c 最小则 $\Delta x = n + 1 - c$, 保存运动量, 结束搜索, 否则进行下一步;

4) 若 $C_l < C_r$, 则改变搜索区间, 将 c 的值赋给 b , 若 $C_l > C_r$, 则改变搜索区间, 将 c 的值赋给 a ; 转步骤 2)。

与全局搜索算法相比该算法能大大减少计算量。当搜索区间长度为 $(2^k + 1)$ 时, 全局搜索算法的运算量为 $(2^k + 1)$, 而本文提出的改进算法的运算量不超过 $3k$ 。

根据表 1 可知在 1 Hz 时卫星平台振动幅值最大, 其振动方程为 $x(t) = 10\sin(2\pi t)$, 单位为像素。假设在 TDICCD 一次曝光时间内, 快速面阵 CCD 曝光 10 次。利用改进的灰度投影算法检测到的位移曲线如图 3 所示, 算法中以第一帧图像作为参考帧。

由图 3 可以看出, 检测的位移与施加的振动不超过 0.5 个像素。

3.2 振动补偿技术

得到卫星振动参量后, 则可以根据振动参量控制卫星振动补偿装置, 如图 4 所示。其工作原理为: 根据检测到的卫星振动参量来控制振镜的振动, 通过振镜的振动效果抵消卫星振动效果, 从而使 TDICCD 相机拍摄到清晰的图像。

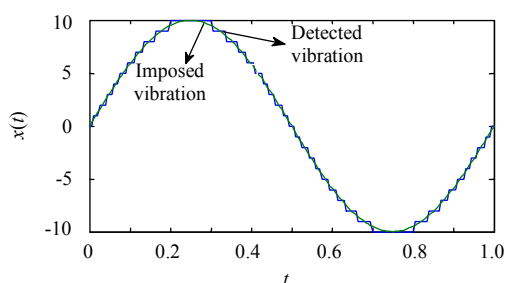


图 3 位移曲线

Fig.3 Displacement curve

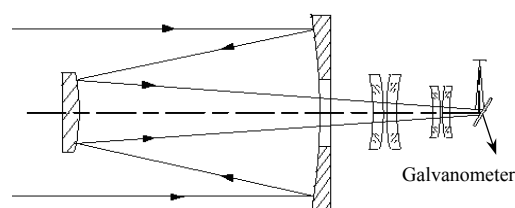


图 4 卫星振动补偿装置

Fig.4 Satellite vibration compensating equipment

4 结 论

本文详细分析了振动对 TDICCD 相机成像质量的影响, 表明对于 TDICCD 不能简单的将正弦振动分为高频振动和低频振动。文中根据 NASA/GSFC 提供的 LANDSAT-4 的振动数据计算了卫星平台振动对 TDICCD 相机的 MTF 影响。计算结果表明: 卫星振动对 TDICCD 相机的 MTF 的影响与 TDICCD 积分级数有密切关系, 当积分级数大于或等于 54 时, 振动 MTF 值已下降到小于 95%。为消除卫星振动对 TDICCD 成像质量的影响, 本文提出了基于快速 CCD 的卫星振动检测技术和基于振镜的振动补偿技术。在振动检测技术中, 本文提出了一种改进的灰度投影算法, 该算法与传统算法相比能有效的减少计算量, 本文利用该算法对卫星振动位移进行了检测, 检测的位移与施加的振动之间的误差不超过 0.5 个像素, 在检测出卫星振动量后利用基于振镜的卫星振动补偿装置对卫星振动进行了补偿。

参考文献:

- [1] 王德江, 匡海鹏, 蔡希昌, 等. TDI-CCD 全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2465-2472.
WANG De-jiang, KUANG Hai-peng, CAI Xi-chang, et al. Digital implementation of forward motion compensation in TDI-CCD panoramic aerial camera [J]. *Opt. and Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2465-2472.
- [2] 杨秀彬, 贺小军, 张刘, 等. 偏流角误差对 TDICCD 相机成像的影响与仿真[J]. 光电工程, 2008, 35(11): 45-50, 56.
YANG Xiu-bin, HE Xiao-jun, ZHANG Liu, et al. Effect and Simulation of the Deviant Angle Error on TDICCD Cameras Image [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(11): 45-50, 56.
- [3] Hadar O, Fisher M, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part III: numerical calculation of modulation transfer function [J]. *Opt. Eng.*(S0091-3286), 1992, 31(3): 581-589.

- [4] Hadar O, Dror I, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part IV: numerical calculation of optical transfer function and experiment verification [J]. **Opt. Eng.**(S0091-3286), 1994, **33**(4): 566-578.
- [5] 陈丁跃, 周仁魁, 李英才. 随机振动对星载 TDICCD 影响分析[J]. 光子学报, 2004, **33**(4): 1247-1250.
CHEN Ding-yue, ZHOU Ren-kui, LI Ying-cai. Influence Analysis of Random Vibration on TDICCD Camera [J]. **Acta Photonica Sinica**, 2004, **33**(4): 1247-1250.
- [6] Saifollah Rasouli, Mohammad Taghi Tavassoly. Determination of vibration parameters of a large-scale structure by measuring the visibility changes on the time-averaged images of a sinusoidal pattern fixed on it [J]. **Optical Engineering**(S0091-3286), 2008, **47**(5): 053603-1-053603-6.
- [7] 郭永彩, 高潮, 王婀娜. 基于小波变换和非负支撑域递归滤波算法的盲目图像复原[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3000-3003.
GUO Yong-cai, GAO Chao, WANG E-nuo. Blind Image Restoration Algorithm Based on Wavelet Transform and NAS-RIF Algorithm [J]. **Acta Optica Sinica**, 2009, **29**(11): 3000-3003.
- [8] 胡家升, 马明. 运动模糊图像的判定与恢复[J]. 大连理工大学学报, 2009, **49**(3): 438-444.
HU Jia-sheng, MA Ming. Identification and restoration of motion-blurred image [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2009, **49**(3): 438-444.
- [9] Oren Haik, Yitzhak Yitzhaky. Superresolution reconstruction of a video captured by a vibrated time delay and integration camera [J]. **Journal of Electronic Image**(S1017-9909), 2006, **15**(2): 023006-1-023006-12.
- [10] WU Jia-gu, ZHENG Zhen-zhen, FENG Hua-jun, *et al.* Restoration of TDI camera images with motion distortion and blur [J]. **Optics & Laser Technology**(S0030-3992), 2010, **42**: 1198-1203.
- [11] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
LÜ Nai-guang. **Fourier Optics** [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [12] 许永森, 丁亚林, 田海英, 等. 推扫式航空遥感器像移补偿精度的分析[J]. 光学 精密工程, 2009, **17**(2): 453-459.
XU Yong-sen, DING Ya-lin, TIAN Hai-ying, *et al.* Analysis of image motion compensation accuracy for aerial push-broom sensor [J]. **Opt. Precision Eng.**, 2009, **17**(2): 453-459.
- [13] 陈纯毅, 于宁, 杨华民, 等. 卫星振动对光通信误码率影响的计算机仿真[J]. 长春理工大学学报, 2005, **28**(4): 71-73.
CHEN Chun-yi, YU Ning, YANG Hua-ming, *et al.* Computer simulation of the Influence of Satellite Vibration on the Bit Error Rate of Optical Communication [J]. **Journal of Changchun University of Science and Technology**, 2005, **28**(4): 71-73.
- [14] 任航, 张涛. 基于灰度投影法运动估计的成像 CCD 平移补偿法[J]. 应用光学, 2009, **30**(3): 417-422.
REN Hang, ZHANG Tao. Imaging CCD translation compensation method based on movement estimation of gradation projection technology [J]. **Journal of Applied Optics**, 2009, **30**(3): 417-422.