

文章编号 1004-924X(2014)06-1418-06

测量空间相机像移量的联合变换相关器的改进

许博谦^{1,2*}, 郭永飞¹, 王刚¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对基于光学手段实现的传统光学联合变换相关器不适应空间环境等问题,对传统相关器进行了改进和试验验证。首先,采用完全电子学手段替代采用光学器件实现的方法解决了联合变换相关器适应空间环境的问题。然后,在联合变换过程中加入自相关运算,消除了零级衍射峰的影响,并引入过采样离散傅里叶变换方法提升相关器的测量精度。最后,采用精密直线导轨开展静态测试试验,验证了改进后的联合变换相关器的性能。静态测试试验表明:对于亚像元级的微小位移量,改进后的联合变换相关器测量误差均方根(RMS)值为0.22 pixel。改进后的联合变换相关器显示了良好的空间环境适应性和较好的可实现性,其精度基本满足空间相机像移补偿的要求。

关键词:遥感相机;像移量测量;联合变换相关;亚像元;离散傅里叶变换

中图分类号:V447.3;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142206.1418

Improvement of joint transform correlator for measurement of space camera image motion

XU Bo-qian^{1,2*}, GUO Yong-fei¹, WANG Gang¹

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

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: ciomp_xubq@126.com*

Abstract: As traditional joint transform correlators based on space light modulators can not adapt to the radioactive environment in space, a new correlator implemented by an electronic processor was introduced and testified. First, the traditional optical device was replaced by a digital processor to allow the new correlator to adapt to the radioactive environment. Then, a self-correlation calculation was added to the joint transform processing to eliminate the influence of zero-level diffraction, and the over-sampled discrete Fourier transform method was introduced to increase the measurement precision. Finally, the static measurement with a linear platform was performed to testify the improved joint transform correlator. Experimental results indicate that the measuring precision of the system on sub-pixel displacement is within 0.22 pixel(Root Mean Square, RMS). The improved joint transform correlator is good at both space environment adaptability and realization, its measurement precision can satisfy the system requirements of satellite cameras for the image motion compensation, and has a

收稿日期:2013-03-26;修订日期:2013-05-13.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61205143)

good application prospect.

Key words: remote sensing camera; image motion measurement; joint transform correlation; subpixel; discrete Fourier transform

1 引言

空间相机的分辨率已经达到 μrad 量级^[1-2], 任何微小扰动如平台振动等都会造成视轴振颤, 进而产生像移, 造成图像模糊退化^[3]。因此, 有必要发展能够在轨实现的快速高精度像移补偿技术。像移量的精确测量是发展像移补偿技术的先决条件, 2004 年欧空局提出在空间相机的焦平面安装辅助面阵探测器, 对采集的相邻帧图像, 采用联合变换相关器 (Joint Transform Correlator, JTC) 测量像移量^[4-5]。该方法受欠曝光、离焦等外界因素的影响较小^[6-7], 具有良好的应用前景。

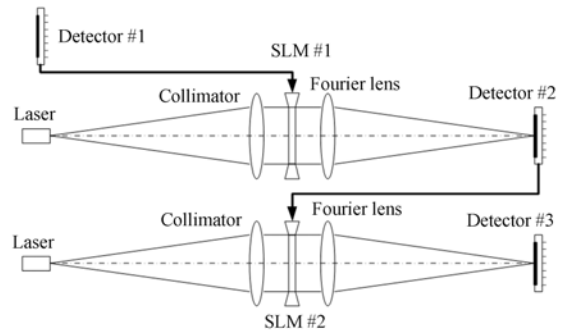
原始的联合变换相关器借助两部空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 实现, 结构复杂, 相关峰的提取精度较低。因此, 研究人员对它做了一系列改进: 通过改进其实现方式, 简化了硬件结构^[8]; 采用强度权重质心法, 有效提高了测量精度^[9]。但是, 目前的改进型联合变换相关器的实现机制仍然基于 SLM 等光学手段^[10-12], 存在体积重量较大、不能抵御空间辐射环境、可靠性较低等问题, 无法应用于空间相机。另外, 目前的研究仍主要针对像元级的大幅度位移, 对于空间相机的亚像元级像移量探测的原理和试验研究尚不充分。

为了将联合变换相关器应用于空间相机, 本文改变了传统联合变换相关器依赖 SLM 的光学实现方式, 完全采用电子学手段来实现相关器。另外, 在处理过程中加入过采样离散傅里叶变换方法来提高算法的测量精度。通过搭建半实物仿真实验平台, 采集亚像元级位移的图像, 开展了静态测量试验。试验表明, 上述改进提升了联合变换相关器的空间环境适应性和可实现性, 可满足空间相机像移补偿的要求。

2 联合变换相关器改进

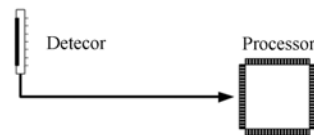
2.1 联合变换相关器实现方式改进

传统的联合相关器结构^[10-12]如图 1(a) 所示。面阵探测器 #1 快速拍摄图像序列, 并将其中前后相邻的两帧组合加载于 SLM, 通过由 SLM、傅里叶变换透镜等器件组成的光学二维傅里叶变换单元, 对组合图像实施相关运算, 获得相关峰的位置信息, 即可得到采集时间间隔内的像移量。



(a) 传统联合相关变换器

(a) Traditional joint transform correlator



(b) 改进后的联合相关变换器

(b) Improved joint transform correlator

图 1 传统联合相关器与改进后的联合相关器对比

Fig. 1 Comparison of traditional and improved joint transform correlators

如果拍摄的第一帧图像 $i_1(x, y)$ 的中心位于 $(-a, 0)$, 第二帧图像 $i_2(x, y)$ 的中心位于 $(a, 0)$, 则两者组合成的合成图像为 $i_{1,2}(x, y)$ 。令两帧图像的相对位移为 $(\Delta x, \Delta y)$, 则有:

$$i_{1,2}(x, y) = i_1(x + a, y) + i_2(x - a + \Delta x, y + \Delta y). \quad (1)$$

经过联合变换相关器计算可得:

$$i_{1,2}(\xi, \eta) = i_1(\xi, \eta) \otimes i_1(\xi, \eta) + i_2(\xi, \eta) \otimes i_2(\xi, \eta) + i_1(\xi, \eta) \otimes i_2(\xi, \eta) * \delta(\xi + 2a - \Delta x, \eta - \Delta y) + i_2(\xi, \eta) \otimes i_1(\xi, \eta) * \delta(\xi - 2a + \Delta x, \eta + \Delta y), \quad (2)$$

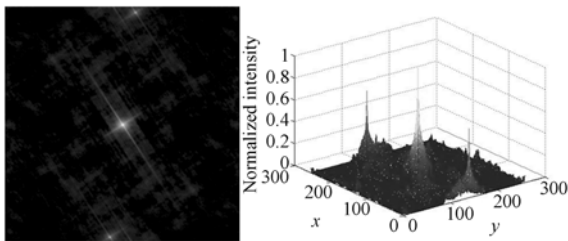
式中: \otimes 代表相关运算, $*$ 代表卷积运算; 第三项和第四项称为正、负一级衍射, 即相关信号, 包含了两帧图像之间的相对位移量。通过确定相关峰的位置, 即可测得两帧图像间的相对位移矢量。

传统的联合变换相关器存在体积重量较大、系统复杂、不适应空间辐射环境、可靠性低等问题。因此, 本文采用电子学手段实现相关器, 通过电子图像处理如现场可编程门阵列 (FPGA) 实现全部相关运算, 测量两帧图像间的像移量。

在采用电子学手段实现联合相关器时, 可以采用多种手段优化原始算法, 相比传统的联合变换相关器更加灵活。例如, 在最终输出的互相关图像中, 由 $i_1(x, y)$ 与 $i_2(x, y)$ 的自相关信号累加成的零级衍射峰信号最强, 给自相关峰的位置提取带来了一定困难。为此, 分别独立计算 $i_1(x, y)$ 与 $i_2(x, y)$ 的自相关图像 $i_1(\xi, \eta) \otimes i_1(\xi, \eta)$ 和 $i_2(\xi, \eta) \otimes i_2(\xi, \eta)$, 再从式 (2) 计算得到的互相关图像中减去两帧自相关图像, 可得:

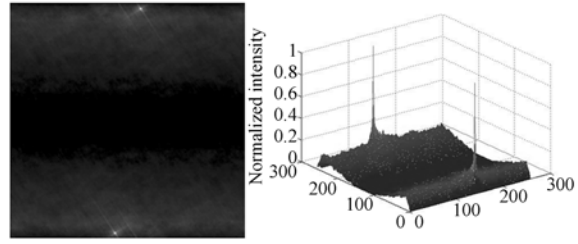
$$i_{1,2}(\xi, \eta) - i_1(\xi, \eta) \otimes i_1(\xi, \eta) - i_2(\xi, \eta) \otimes i_2(\xi, \eta) = i_1(\xi, \eta) \otimes i_2(\xi, \eta) * \delta(\xi + 2a - \Delta x, \eta - \Delta y) + i_2(\xi, \eta) \otimes i_1(\xi, \eta) * \delta(\xi - 2a + \Delta x, \eta + \Delta y). \quad (3)$$

上述运算可以有效消除零级衍射峰的影响, 得到的结果是只含有互相关峰信息的图像, 如图 2(b) 所示。截取最终输出图像的一半区域, 对它实施阈值滤波后, 采用全局质心算法, 仅需要一个步骤即可准确地提取相关峰的位置信息, 从而实现了互相关峰的自动化提取。



(a) 消除零级衍射前的互相关图像

(a) Correlation image with self-correlation



(b) 消除零级衍射后的互相关图像

(b) Correlation image without self-correlation

图 2 消除零级衍射前后的互相关图像对比

Fig. 2 Comparison of correlation images with and without self-correlations

2.2 联合变换相关器的精度提高

在空间相机的曝光时间内, 像移引起的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 下降因子表示为^[13]:

$$MTF_{IM}(u) = \frac{\sin(\pi u \Delta x)}{\pi u \Delta x}, \quad (4)$$

式中: 自变量 u 代表归一化空间频率, 在采样系统的 Nyquist 频率处, u 取 0.5; Δx 代表曝光时间内的像移量。因此, 在空间相机的 Nyquist 频率处, 像移引起的传递函数下降因子为:

$$MTF_{IM@Nyquist} = \frac{\sin(\pi \Delta x / 2)}{\pi \Delta x / 2}. \quad (5)$$

经过计算可知, 当曝光时间内的像移量达到 1.0 pixel 时, 空间相机在 Nyquist 频率处的传递函数衰减因子为 0.637, 严重影响图像质量。因此, 像移测量的精度必须优于 1.0 pixel。

基于 SLM 实现的传统联合相关器仅能够测量像元级的位移, 不具备亚像元级微位移的探测能力。由联合变换相关器中元器件结构参数间的关系^[14]可知, 其原因在于: 辅助面阵探测器对目标区域成像既是空间采样的过程, 也是低通滤波的过程, 如此使含有高空间频率的信息无法反映在探测器输出的图像上。设探测器的像元尺寸为 a_D , 则它所能探测的空间频率为:

$$f_D = 1/2a_D. \quad (6)$$

因此, 所有高于 f_D 的空间频率信息都会随着探测器的采样过程丢失, 导致相关器无法探测微小的像移量。为了补偿这部分损失掉的高频信息, 需要对采集的图像进行二维插值, 但是这会大幅增加计算量, 特别是空间相机对像移量的测量

有着严格的时效性要求,无法承受过大的计算量或是过多的计算步骤。由于计算过程中包含两次傅里叶变换,因此考虑对傅里叶变换系数进行插值,即在相关运算的过程中,对离散傅里叶变换实施过采样,以提高探测精度。二维离散傅里叶变换的表达式为^[13]:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right],$$

$$u=0, 1, \dots, M, v=0, 1, \dots, N. \quad (7)$$

$$F(u, v) = \frac{1}{pMqN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \exp[-j2\pi((2a - \Delta x)x - \Delta y \cdot y)] I_2(x, y) I_1^*(x, y) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{ux}{pM} + \frac{vy}{qN}\right)\right] =$$

$$\frac{1}{pMqN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_2(x, y) I_1^*(x, y) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{ux}{pM} + (2a - \Delta x)x + \frac{vy}{qN} - \Delta y \cdot y\right)\right] =$$

$$\frac{1}{pMqN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_2(x, y) I_1^*(x, y) \exp\left[-j2\pi\left((u + pM(2a - \Delta x))\frac{x}{pM} + (v - qN\Delta y)\frac{y}{qN}\right)\right]. \quad (9)$$

作为对比,采用式(7)对式(2)中的第四项实施变换,结果为:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \exp[-j2\pi((2a - \Delta x)x - \Delta y \cdot y)] I_2(x, y) I_1^*(x, y) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right] =$$

$$\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_2(x, y) I_1^*(x, y) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{ux}{pM} + (2a - \Delta x)x + \frac{vy}{N} - \Delta y \cdot y\right)\right] =$$

$$\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_2(x, y) I_1^*(x, y) \exp\left[-j2\pi\left((u + M(2a - \Delta x))\frac{x}{M} + (v - N\Delta y)\frac{y}{N}\right)\right]. \quad (10)$$

式(7)中,当 $u = -pM(2a - \Delta x)$ 、 $v = qN\Delta y$ 时出现极值;而在式(8)中,当 $u = -M(2a - \Delta x)$ 、 $v = N\Delta y$ 时出现极值。实际上,以上各式中只有位移量 Δx 和 Δy 是连续变化的量,其他变量都是离散量,这是探测器空间采样的必然结果。从推导中发现,式(10)实际只能提取到像元级的位移量,对亚像元级的位移测量存在较大随机性;而式(9)的过采样离散傅里叶变换则将亚像元的信息通过过采样因子的放大体现于数字图像中,其所能测量的亚像元级位移的精度受过采样因子的制约。由式(9)可知,理论上过采样因子的取值与测量算法所需达到的精度呈倒数关系,例如测量 0.1 pixel 级的像移,需要过采样因子达到 10 才能得到预期的测量精度。

定义 x, y 两个维度上的过采样因子分别为 p, q , 则二维过采样离散傅里叶变换的表达式为:

$$F(u, v) = \frac{1}{pMqN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{ux}{pM} + \frac{vy}{qN}\right)\right]$$

$$v = 0, 1, \dots, q(N-1), u = 0, 1, \dots, p(M-1). \quad (8)$$

由于联合功率谱公式中仅第三项和第四项包含了有意义的位移信息,因此仅对式(2)中的第四项采用式(8)的方式实施变换,可得:

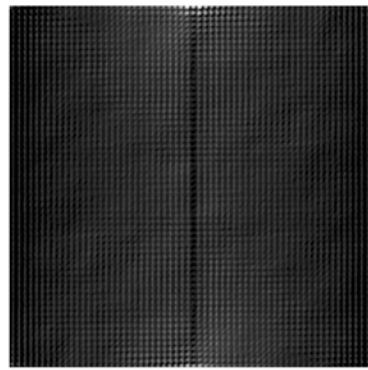


图3 二维过采样相关输出

Fig. 3 Output of 2-dimension over-sampling correlation

3 亚像元级像移静态测量实验

3.1 实验平台构建

为了测试改进后联合变换相关器对亚像元级

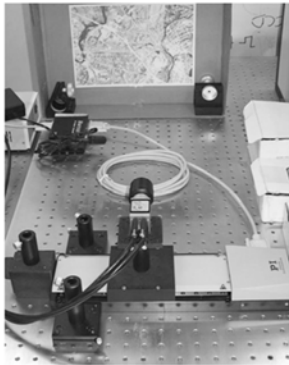


图 4 亚像元级像移图像采集实验装置实物图

Fig. 4 Devices for subpixel image acquisition

微位移的测量精度,构建了如图 4 所示的实验平台。仿真实验采用高精度直线导轨搭载数字 CMOS 相机来采集亚像元级位移的图像。实验采用德国 PI 公司生产的 M-505.6DG 型精密直线导轨,其行程为 150 mm,最小位移量达到 0.05 μm 。数字 CMOS 相机是由德国 Basler 公司生产的 acA2000-50gm/gc,像元尺寸为 5.5 $\mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$,分辨率为 2 040 \times 1 088。另外,相机镜头的焦距为 12 mm,成像距离约为 600 mm。当采集位移精度为 0.1 pixel 的亚像元位移图像时,直线导轨的平移距离为:

$$\Delta x = \frac{H \times a \times 0.1}{f} = \frac{600 \text{ mm} \times 5.5 \mu\text{m} \times 0.1}{12 \text{ mm}} = 27.5 \mu\text{m} . \quad (11)$$

为了能更好地模拟空间相机的工作状态,本实验选取遥感图像作为模拟目标,所拍摄的图像包含丰富的地物信息,尤其是中高频信息,有利于验证联合相关算法对像移的测量精度。本实验中图像之间的相对位移为 0.1 pixel。

3.2 实验结果与误差分析

分别采用精度提高前后的联合变换相关器测量采集到的 30 组图像对,实验结果如图 5 所示。由图 5 可知,提高精度前,联合变换相关器对于像元级位移的探测精度极高,在 0, 1.0, 2.0, 3.0 pixel 等几个位置的精度较高,误差极小,但是对于亚像元级的位移探测能力较弱,几乎没有响应,具体表现在测量曲线呈阶梯形状;而提高精度后,测量曲线更加圆滑,明显更趋近真实值。

经统计,当图像对之间存在小于 1.0 pixel 的相对位移时,改进后的联合变换相关器在提高精度前的最大测量误差高达 0.7 pixel,均方根

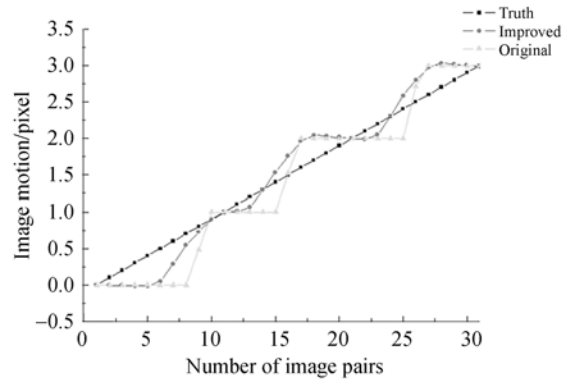


图 5 亚像元级像移量测量实验结果对比

Fig. 5 Test results for subpixel image motion measurement

(Root Mean Square, RMS) 误差约为 0.3 pixel; 而提高精度后,最大测量误差为 0.45 pixel, RMS 误差约为 0.22 pixel,与前者相比, RMS 误差降低了约 26.7%。

事实上,改进后的联合变换相关算法精度并未达到预期的 0.1 pixel,这是因为实验过程中还存在一些外界因素带来的测量误差,包括:

(1) 数字 CMOS 相机的噪声带来的测量误差。探测器的噪声以高频分量的形式存在于采集到的图像中,由于本实验所需的测量精度较高,部分噪声可能被测量算法作为图像的有用信息,参与相关运算,造成精度下降。

(2) CMOS 探测器的像元之间在响应非均匀性,降低了图像对之间的相关性;

(3) 实验装置安装过程中的位置偏差会导致作为参考标准的真实值存在一定的偏差。

如果暂不考虑补偿环节的误差,将测量到的均方误差值代入式(5),可得传递函数衰减因子为:

$$MTF_{IM}^{\text{Nyquist}} = \frac{\sin(\pi \times 0.22/2)}{\pi \times 0.22/2} \approx 0.98 . \quad (12)$$

因此,在提高联合变换相关器的精度以及改进联合相关算法后,由卫星平台振动引起的传递函数损失不超过 2%,是比较理想的结果,已经能够满足空间相机像移补偿技术的要求。

4 结 论

为了提高空间相机像移量的测量精度,基于电子学手段对联合变换相关器进行了改进。通过消除零级衍射峰给互相关峰提取带来的不良影

响,以及采用过采样离散傅里叶变换方法提升相关器对亚像元级位移的测量精度,改进后的联合变换相关器具有更高的可靠性与空间环境适应性。静态测试实验表明,改进后的联合变换相关

器 RMS 测量误差约为 0.22 pixel,较改进前降低了约 26.7%,其对应的 Nyquist 频率处的 MTF 衰减因子约为 0.98,即传递函数损失不超过 2%,能够满足空间相机像移补偿技术的要求。

参考文献:

- [1] 韩昌元. 近代高分辨地球成像商业卫星[J]. 中国光学与应用光学, 2010,3(2):201-208.
HAN CH Y. Recent earth imaging commercial satellites with high resolutions [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(3): 201-208. (in Chinese)
- [2] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. 光学精密工程, 2008,16(11):2164-2172.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11): 2164-2172. (in Chinese)
- [3] 耿文豹,翟林培,丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. 光学精密工程, 2009,17(2): 314-320.
GENG W B, ZHAI L P, DING Y L. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 314-320. (in Chinese)
- [4] TCHERNYKH V, DYBLENKO S, JANSCHKE K, *et al.*. Airborne test results for a smart pushbroom imaging system with optoelectronic image correction [J]. *SPIE*, 2004, 5234:550-559.
- [5] JANSCHKE K, TCHERNYKH V, DYBLENKO S, *et al.*. Compensation of focal plane image motion perturbations with optical correlator in feedback loop [J]. *SPIE*, 2004, 5570:280-288.
- [6] 葛鹏,陈跃庭,李奇,等. 欠曝光下光学联合变换相关器位移探测技术的稳健性研究[J]. 光学学报, 2009,29(7):1796-1800.
GE P, CHEN Y T, LI Q, *et al.*. Robustness study of motion detection based on joint transform correlator without enough illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009,29(7):1796-1800. (in Chinese)
- [7] 樊超,李英才,傅洪亮,等. 离焦对光学相关法测量空间相机像移精度的影响[J]. 光学学报, 2011,31(10): 1028002-1-7.
FAN CH, LI Y C, FU H L, *et al.*. Influence of defocusing on measurement accuracy of image motion of space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10):1028002-1-7. (in Chinese)
- [8] 樊超,李英才,傅洪亮,等. 光学相关法测量空间相机像移的性能研究[J]. 光学学报, 2011,31(7): 0712006-1-5.
FAN CH, LI Y C, FU H L, *et al.*. Research on measurement method of image motion of space camera based on optical correlator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011,31(7):0712006-1-5. (in Chinese)
- [9] 易红伟,赵惠,汶德胜,等. 联合变换相关器像移测量静态仿真实验分析[J]. 光学学报, 2010,30(12): 3471-3475.
YI H W, ZHAO H, WEN D SH, *et al.*. Static simulation experiment of image motion measurement based on optical joint transform correlator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010,30(12): 3471-3475. (in Chinese)
- [10] LIN G, LI Q, FENG H J, *et al.*. Experiments research on motion detection accuracy of joint transform correlator [J]. *SPIE*, 2012, 8561: 85610W-1-8.
- [11] GE P, LI Q, FENG H J, *et al.*. Displacement measurement using phase-encoded target joint transform correlator [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(3):038201-1-11.
- [12] ZHAO H, YI H W, LI Y C, *et al.*. Experimental research on image motion measurement using optical joint transform correlator for space camera application [J]. *SPIE*, 2010, 7830: 78301D-1-8.
- [13] GERALD C H. *CCD Arrays, Cameras and Displays*[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press,1998.
- [14] 王玉荣,徐鹏,王青圃. 光电混合联合变换相关器中各元器件结构参数之间的关系[J]. 光学精密工程, 2005,13(3):376-384.
WANG Y R, XU P, WANG Q P. Relationship between parameters in hybrid optical/electronic joint transforms correlator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(3): 376-384. (in Chinese)

作者简介:



许博谦(1985—),男,黑龙江大庆人,博士研究生,助理研究员,2006年,2008年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事遥感图像处理方面的研究。E-mail: ciomp_xubq@126.com

导师简介:



郭永飞(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1990年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电技术应用,CCD在计算机中的应用等方面的研究。E-mail: gyf@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)