

强度叠置联合变换相关像移测量方法

易红伟*, 李旭阳, 贺天兵, 陈荣利

中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学技术研究室, 陕西 西安 710068

摘要 为了实现像移测量装置的高速、高精度和小型化, 提出一种改进的联合变换相关方法。该方法使用两幅待检测图像强度叠加的方式构造相关输入图像, 利用卫星推扫运动所产生的系统像移实现自相关峰和互相关峰在空间上的分离。用于相关运算的图像被缩小到与待检测图像尺寸相当, 大幅度降低了测量过程的计算量, 从而有利于高速数字联合变换相关器的实现。仿真和实验测试结果表明: 所提方法保持了传统联合变换相关像移测量方法的高精度、抗噪声能力强和对图像纹理不敏感的特点, 并具有实现高速像移测量的潜力。

关键词 测量; 强度叠置; 联合变换相关器; 像移测量; 亚像元

中图分类号 TN751

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0304003

Image Motion Measurements Based on Intensity Superimposition and Joint Transform Correlation Approach

Yi Hongwei*, Li Xuyang, He Tianbing, Chen Rongli

Laboratory of Space Optical Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710068, China

Abstract To achieve high speed, high precision, and device miniaturization, an improved joint transform correlation (JTC) method is proposed. In this method, the correlation input image is constructed by superposing the intensity of two images to be detected. To effectively separate autocorrelation and cross correlation peaks, the method makes use of the constant image motions resulting from satellite movement. The size of each image used for the correlation operation is reduced to the size of the image to be detected, which greatly reduces the calculation of the measurement process, which is beneficial for realizing high-speed digital joint transform correlation. The simulated and experimental results show that the new method maintains the advantages of high accuracy, high robustness to image noise and low dependency on image texture of traditional JTC. Additionally, it also has the potential for high-speed image motion measurements.

Key words measurement; intensity superimposition; joint transform correlator; image motion measurement; sub-pixel

OCIS codes 120.0280; 010.0280; 070.4550

1 引 言

TDI-CCD(Time Delay and Integration Charge Coupled Device)成像器件被广泛用于高分辨率空间光学成像相机,使输出数据的信噪比满足应用的需求。为了保证成像质量,TDI-CCD成像方式要求卫星平台在推扫期间保持高的稳定性。然而,卫星姿态变化、轨道速高比变化、地球自转和星体内部机构颤振等因素都可能破坏这种稳定性,使 CCD 器件

上光生电荷包的转移与焦面影像的运动不一致,造成相机输出影像模糊和畸变^[1-5],即产生像移进而导致像质退化。为了保证图像质量,对长焦距、高分辨率相机的在轨像移进行高速、高精度的测量尤为重要。

为了保证 TDI-CCD 空间相机的成像质量,人们提出了像移在轨高速测量,并进行实时或事后补偿^[6]。用于像移测量的装置应具有高速、高精度和小型化的特点,以满足空间相机在轨工作的要求。

收稿日期: 2019-07-31; 修回日期: 2019-08-16; 录用日期: 2019-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(61427811)

* E-mail: yi_hongwei@126.com

为了实现上述特点,可以使用联合变换相关(JTC)原理构造像移测量装置^[7],即通过高帧频面阵图像传感器在 TDI-CCD 推扫成像期间同步输出图像序列,实时进行相邻图像的 JTC 运算及相关峰测量,从而实现像移的检测。

相关研究表明,JTC 像移测量方法的测量精度能够达到甚至优于 0.1 pixel,完全可以满足空间相机应用的需求^[8-13]。JTC 方法虽然具有高精度、不依赖图像纹理特性和抗噪声能力强等优点,但其计算量相比于其他相关方法(如位相相关法)要大得多。主要原因是在相关运算过程中 JTC 方法需要对大尺寸相关输入图像和联合功率谱图像进行傅里叶变换,例如在完全避免自相关峰和互相关峰相互影响的条件下,相关输入图像和联合功率谱图像的尺寸通常是待检测图像的 6 倍。目前,传统 JTC 方法多采用光学方式来解决运算速度问题,但相对电子学实现方式其结构更复杂,系统制造和装配误差均会对测量精度产生影响,且不能完全脱离电子学运算。

为此,本文提出一种高精度 JTC 像移测量的新方法。该方法对 JTC 相关输入图像的构造方式进行了改进:在空间上以完全重合的强度叠置方式紧密排布两幅待测图像,缩小了相关输入图像的尺寸;并利用相机正常推扫运动所产生的系统像移量来有效分离相关输出图像中的自相关峰和互相关峰,从而大大缩减了相关运算的计算量。仿真和实验测试结果表明:该方法能够保持传统 JTC 像移测量方法的精度,并将相关输入图像尺寸缩减至待测图像大小,使完全以电子学方式实现 JTC 像移高速、高精度在轨测量成为可能。

2 强度叠置 JTC 像移测量的基本原理

传统 JTC 像移测量方法在进行像移测量时,首先通过安装在相机焦面上的高帧频辅助面阵 CCD 采集序列图像。这里将某时刻所采集的序列图像称为被测图像 $f_t(x, y)$,其前一时刻所采集的图像称为参考图像 $f_r(x, y)$ 。相关输入图像由参考图像 $f_r(x, y)$ 和被测图像 $f_t(x, y)$ 共同构成,其中图像 $f_r(x, y)$ 中心的排放位置坐标为 $(0, -a)$, $f_t(x, y)$ 的为 $(0, a)$ 。假设两幅图像间存在相对位移,则相关输入图像 $i(x, y)$ 可表示为

$$i(x, y) = f_r(x, y - a) + f_t(x + \delta x, y + a + \delta y), \quad (1)$$

式中: δx 为沿图像 x 方向的像移量; δy 为沿图像 y

方向的像移量。经过傅里叶变换后可得到图像 $i(x, y)$ 的频谱函数 $T(u, v)$,表达式为

$$T(u, v) = F_r(u, v) \exp(-2i\pi av) + F_t(u, v) \exp\{2i\pi[u\delta x + (a + \delta y)v]\}, \quad (2)$$

式中: u, v 为空间频率; $F_r(u, v)$ 为参考图像频谱; $F_t(u, v)$ 为被测图像频谱。联合变换功率谱为 $|T(u, v)|^2$,具体表达式为

$$|T(u, v)|^2 = |F_r(u, v)|^2 + |F_t(u, v)|^2 + F_r F_r^* \exp\{2i\pi[u\delta x + (2a + \delta y)v]\}, \quad (3)$$

式中: $*$ 表示共轭运算。对联合变换功率谱进行傅里叶逆变换和取模平方,得到的即为相关输出图像,其数学表达式为

$$c(x, y) = f_r(x, y) \otimes f_r(x, y) + f_t(x, y) \otimes f_t(x, y) + f_r \otimes f_t \times \delta(x - \delta x, y - 2a - \delta y) + f_t \otimes f_r \times \delta(x + \delta x, y + 2a + \delta y), \quad (4)$$

式中: \otimes 为卷积运算。(4)式共包含 4 项,前两项分别为参考图像、被测图像各自的自相关项结果,后两项分别为参考图像、被测图像的互相关项结果。两个自相关峰位于相关输出图像的中心,两个互相关峰依据参考图像和被测图像中心在相关输入图像中的位置呈对称分布,并因像移的影响发生了局部偏移。对互相关峰位置的检测等价于对两幅序列图像间的像移量的测量。对(4)式分析可知,当两幅图像在相关输入图像中的中心间隔为 $2a$,并且 a 的大小等于序列图像的宽度时,在相关输出图像中可以获得自相关峰和互相关峰的完整信息,并且自相关峰和互相关峰不会互相影响,如图 1(a)所示。此时,用于相关运算的图像尺寸是待测影像尺寸的 6 倍。由于需要对大尺寸图像进行两次傅里叶变换,像移测量的计算量大幅度增加。

为了提高相关性能,Javidi 等^[14]提出一种对联合功率谱进行二值化处理的改进方法,即二值化联合变换相关器(BJTC)。相比传统 JTC,功率谱经过二值化处理后能够产生较高的相关峰强度,且自相关峰和互相关峰的宽度大幅缩减,如图 1(b)所示。

相关峰宽度的缩减为减小 JTC 计算量提供了可能性。经过研究,本文提出一种新的改进型 JTC 像移测量方法,即强度叠置型 JTC 像移测量方法(ISJTC)。该方法与传统 JTC 最大的区别是不再按照一定的间隔将两幅待检测序列图像排布在全零矩阵中以构造一幅更大尺寸的相关输入图像,而是将两幅序列图像按像素位置直接进行强度(或灰度)叠

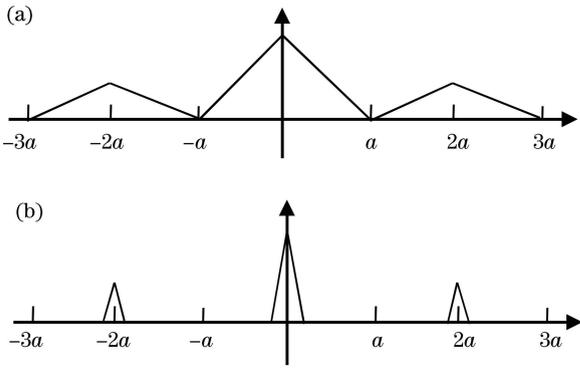


图 1 不同 JTC 方法的相关峰分布情况。

(a)传统 JTC;(b) BJTC

Fig. 1 Distribution of the correlation peaks of different JTC methods. (a) Conventional JTC; (b) BJTC

加。所构造的相关输入图像 $i(x, y)$ 可表示为

$$i(x, y) = f_r(x, y) + f_i(x + \delta x, y + \delta y + s), \quad (5)$$

式中: f_r 为前一时刻采集的参考图像; f_i 为当前时刻采集的被测图像; δx 、 δy 为两幅图像间待测的像移量; s 为因卫星推扫运动在图像两次采集间隔所产生的系统像移量, 如图 2 所示。

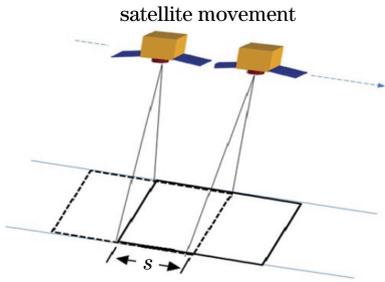


图 2 卫星推扫运动所产生的系统像移量

Fig. 2 Constant image motion resulting from satellite movement

将相关输入图像 $i(x, y)$ 进行傅里叶变换并取模平方可得到联合功率谱图像, 对联合功率谱图像进行二值化处理, 再进行傅里叶逆变换和取模平方操作, 就可获得相关输出图像, 其数学表达式为

$$c(x, y) = f_r(x, y) \otimes f_r(x, y) + f_i(x, y) \otimes f_i(x, y) + f_r \otimes f_i \times \delta(x - \delta x, y - s - \delta y) + f_i \otimes f_r \times \delta(x + \delta x, y + s + \delta y). \quad (6)$$

由(6)式可见, ISJTC 与传统 JTC 方法相关输出图像的结构一致, 其中的关键是 ISJTC 利用卫星平台运动所产生的系统像移量 s 实现了自相关峰和互相关峰在空间上的自然分离, 对联合功率谱进行二值化处理使相关峰的宽度变窄, 避免了相关峰之

间的影响。这里应该特别注意, ISJTC 对相关输入图像构造方式的改进使相关运算中需进行傅里叶变换的图像的尺寸由原序列图像尺寸的 6 倍缩减到与序列图像相同, 整个像移检测过程的计算量得到了大幅度的减少。例如, 对于两幅 $M \times M$ (单位: pixel) 大小的图像, 传统 JTC 相关输入图像大小为 $6M \times 6M$, 对其进行一次 FFT (Fast Fourier Transform) 的计算复杂度为 $o(72M^2 \lg 6M)$, 而 ISJTC 中进行一次 FFT 的计算复杂度为 $o(2M^2 \lg M)$ 。当图像大小为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 时进行一次 FFT 的计算复杂度缩减为原来的 0.0202。

3 性能仿真评估

3.1 精度测量仿真实验

ISJTC 精度测量仿真实验中使用了 6 幅具有不同地物内容的图像作为原始图像, 分别为城市、沙漠、山地、海面、田地和乡镇。图像大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 如图 3 所示。

利用原始图像产生像移测量序列图像, 序列图像尺寸为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 。在相邻两幅序列图像之间的列方向上引入 20 pixel 的正向像移用以模拟因卫星推扫运动而产生的系统像移量, 即图像列方向为穿航方向。在序列图像的行、列方向均引入 $-10 \sim 10 \text{ pixel}$ 的随机数扰动, 用于模拟因平台不稳定而在沿航和穿航方向产生的非正常像移。

图 4 为仿真分析过程中的典型实验结果。其中, 图 4(a) 为对两幅相邻的乡镇序列图像进行强度叠加所产生的相关输入图像, 图像大小为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 。对其进行第一次傅里叶变换得到的联合功率谱图像如图 4(b) 所示。这里的联合功率谱图像经过了中值二值化处理。再对联合功率谱图像进行傅里叶逆变换, 得到相关输出图像, 如图 4(c) 所示。由于对联合功率谱进行了二值化处理, 相关峰变得很锐利, 而 20 pixel 的系统像移量使自相关峰和两个互相关峰在空间上得到了分离。在因卫星平台扰动而产生的非正常像移为 0 的情况下, 三个相关峰应位于图像坐标中心所在的列上, 互相关峰相对图像坐标中心对称分布, 并相距 40 pixel。这里由于非正常像移不为 0, 所以两个互相关峰的位置存在对称偏移。两幅图像间存在的像移量可以通过检测任一互相关峰位置得到。

在无噪声情况下对 ISJTC 的像移测量精度进行了评估。测试数据为基于每种原始图像所产生的 6 组测试图像, 每组测试图像由 100 frame 序列图像

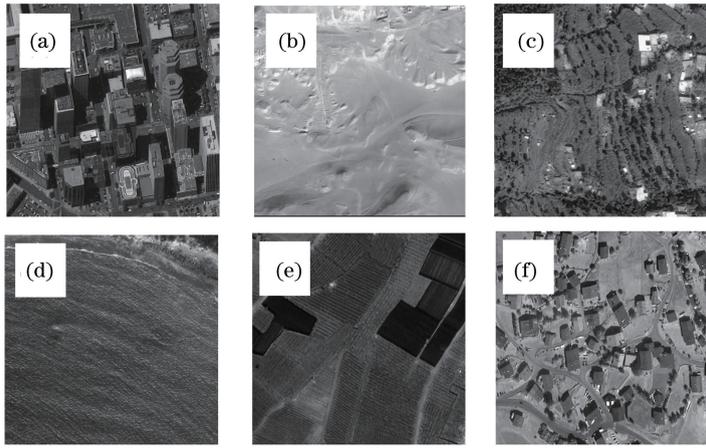


图 3 不同地物内容的测试图像。(a)城市;(b)沙漠;(c)山地;(d)海面;(e)田地;(f)乡镇

Fig. 3 Different images for test. (a) City; (b) desert; (c) massif; (d) sea surface; (e) cropland; (f) town

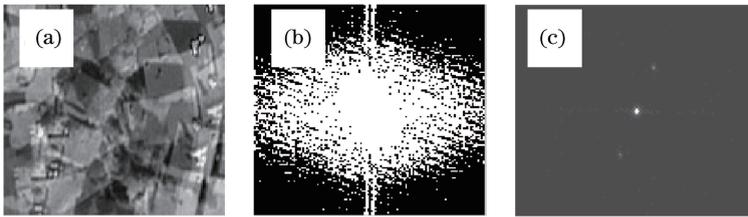


图 4 ISJTC 仿真实验典型结果。(a)相关输入图像;(b)联合功率谱图像;(c)相关输出图像

Fig. 4 Simulation experiment results of ISJTC. (a) Input images; (b) joint power spectrum image; (c) related output image

组成,序列图像之间存在 $-10\sim 10$ pixel的随机像移量,测试结果如表1所示。

由表1可见,ISJTC方法对各组测试序列图像

表 1 不同内容图像的像移测量均方根误差

Table 1 RMSE of image motion measurement of different images

Image	x direction /pixel	y direction /pixel
City	0.026	0.029
Desert	0.024	0.039
Massif	0.025	0.034
Sea surface	0.023	0.031
Cropland	0.031	0.046
Town	0.041	0.029

的像移测量的均方根误差(RMSE)均小于0.05 pixel,并且图像内容对像移测试精度的影响不明显。

空间相机利用卫星平台在轨道上的高速飞行完成推扫成像。为了在实际情况下有效实现像移测量,满足采样频率并避免拖尾现象,面阵图像传感器主要在高速、短曝光条件下工作。因此,像移测量装置必须具备良好的抗噪性能。在仿真中,对ISJTC方法的抗噪能力进行了评估。测试数据为不同信噪比(SNR)情况下由城市图像产生的7组测试图像,每组测试图像由100 frame序列图像组成。典型测试图像如图5所示。

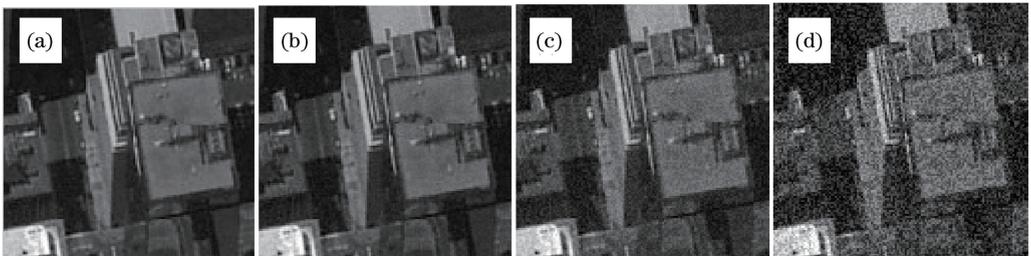


图 5 不同信噪比下的典型测试图像。(a) 42 dB; (b) 30 dB; (c) 20 dB; (d) 12 dB

Fig. 5 Typical test images of different SNRs. (a) 42 dB; (b) 30 dB; (c) 20 dB; (d) 12 dB

ISJTC 方法的抗噪能力测试结果如表 2 所示。由表 2 可知,采用 ISJTC 方法进行像移测量具有较好的抗噪性能。当图像的 SNR 高于 25 dB 时,像移测量 RMSE 优于 0.05 pixel。当图像的 SNR 为 17 dB 时,像移测量的 RMSE 仍然优于 0.10 pixel。即使图像的 SNR 为 12 dB 时,像移测量的 RMSE 仍优于 0.20 pixel,满足空间相机像移测量精度的需求。

表 2 不同信噪比下的像移测量均方根误差

Table 2 RMSE of image motion measurement under different SNRs

SNR /dB	x direction /pixel	y direction /pixel
42	0.027	0.025
35	0.033	0.028
30	0.029	0.028
25	0.034	0.032
20	0.058	0.046
17	0.092	0.059
12	0.173	0.145

3.2 速度测量仿真实验

ISJTC 速度测量仿真实验是为了评估如果采用电子学实现方式 ISJTC 方法是否能满足空间相机像移测量速度的需求。卫星平台稳定性不足是引起 TDI-CCD 空间相机推扫成像非正常像移的主要因素。NASA (LANDSAT4 卫星)、ESA (OLYMPUS 卫星) 和日本 (ETS-VI 实验卫星) 等国及相关研究机构的测试研究表明^[15-18]: 卫星振动频谱较宽,可以达到 2 kHz,但对相机像质产生显著影响的振动主要集中在低频的 200 Hz 以内,其振动呈现低频高幅度和高频低幅度的特点。因此,根据奈奎斯特采样定律,对其平台振动的有效测量需要达到 200 Hz 的 2 倍,即像移测量的速度需要至少达到 400 Hz 以上。

为此,实验中针对 ISJTC 测量方法进行了 FPGA 硬件设计及测试,如图 6 所示。硬件系统采用 Xilinx 公司的 Virtex-4 系列 FPGA,代码使用 verilog 语言在 ISE 开发环境下实现,整个系统通过 CameraLink 接口接收高速面阵相机图像数据。在 ISE 仿真环境下,对 128 pixel×128 pixel 大小序列图像进行 ISJTC 像移测量运算,结果表明在 100 MHz 的工作频率下,采用流水线工作模式完成 1 次像移测量的处理周期小于 2 ms,即可以实现优于 500 Hz 的测量速度,这一测量速度(大于 400 Hz)完全能够满足空间相机推扫成像对像移测量速度的需求。

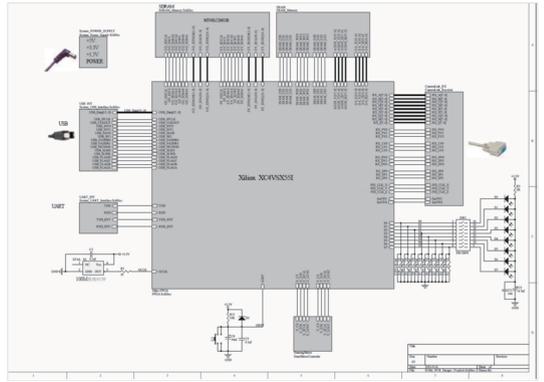


图 6 ISJTC 方法的 FPGA 硬件测试系统设计图

Fig. 6 Design diagram of FPGA hardware system for ISJTC method

4 实验验证

通过动态验证实验对 ISJTC 方法的实际可行性进行初步评估。实验系统由视频相机、电动传送台、图像采集及像移测量计算机组成。在实验中,运动目标为美国 Ikonos 卫星影像数据(denver),目标图像实际物理尺寸为 300 mm×600 mm,它被贴附在电动传送台上产生与相机的相对运动,如图 7 所示。电动传送台上的传送带可以实现无级变速,最大运动速度为 0.5 m/s。



图 7 实验中的运动目标

Fig. 7 Moving target in the experiment

视频相机以 40 frame/s 的帧频对推扫运动目标进行序列图像采集,形成 83 frame 的序列图像。在计算机中对序列图像进行 ISJTC 像移方法的整个计算过程,像移测量结果如图 8 和 9 所示。从图 8 和 9 中可看出,电动传送带的运动使相邻序列图像间产生了平均 -27 pixel 的系统像移,而由于传送带运动的不平稳性,在推扫方向上产生了最大 6.85 pixel 的非正常像移,在垂直推扫方向上产生了最大 4.35 pixel 的非正常像移。利用测量结果对所采集的序列图像进行像移补偿和峰值信噪比

(PSNR)分析,结果如图10所示。由图10可知,ISJTC像移测量方法对实际拍摄的运动目标图像进行了有效的像移测量,校正后图像序列中消除了因电动传送台运动不平稳而产生的非正常像移。图像序列的PSNR均值由校正前的38.8提高到了校正后的41.5。

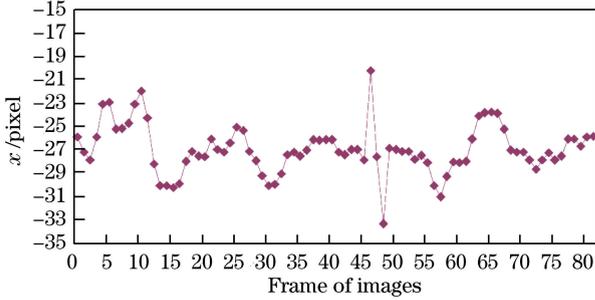


图8 行方向像移测量结果

Fig. 8 Image motion measurement results in x direction

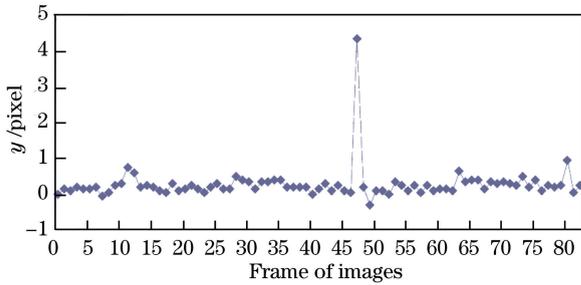


图9 列方向像移测量结果

Fig. 9 Image motion measurement results in y direction

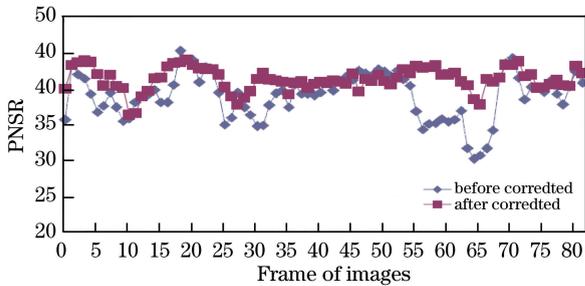


图10 图像序列PSNR计算结果

Fig. 10 PSNR of image sequence

5 结 论

JTC像移测量方法是实现轨实时像移测量的有效途径。利用像移测量数据进行在线或离线补偿可以有效消除卫星平台扰动对空间相机推扫影像像质退化的影响。本文所提出的强度叠置联合变换相关像移测量方法采用两幅序列图像强度叠加的方式构造相关输入图像,将图像尺寸缩减至传统JTC相关输入图像的1/6,大幅度降低了像移测量过程

的计算量。同时,所提方法利用卫星推扫运动所产生的系统像移量实现了自相关峰和互相关峰在空间上的分离,使完全以电子学方式实现JTC像移高速、高精度在轨测量成为可能。所提方法的仿真和实验测试结果表明:所提方法保持了传统JTC像移测量方法高精度、抗噪声能力强和对图像纹理不敏感的特点,并具有实现高速像移测量的潜力。采用该方法将有利于实现空间相机在轨像移测量的高速、高精度和装置小型化。

参 考 文 献

- [1] Wong H S, Yao Y L, Schlig E S. TDI charge-coupled devices: design and applications [J]. IBM Journal of Research and Development, 1992, 36(1): 83-106.
- [2] Wang H J, Wang W, Wang X, et al. Space camera image degradation induced by satellite micro-vibration [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(10): 1212-1217.
王红娟, 王伟, 王欣, 等. 航天器微振动对空间相机像质的影响[J]. 光子学报, 2013, 42(10): 1212-1217.
- [3] Liao J Y, Gao X D, Liang W. Dynamic MTF analysis and research for aerial camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(5): 679-683.
廖靖宇, 高晓东, 梁伟. 航空相机动态调制传递函数分析与研究[J]. 光子学报, 2011, 40(5): 679-683.
- [4] Lü H Y, Liu Y, Xue X C. Selecting the optimal integral grade for TDI CCD in remote sensing cameras[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(6): 642-648.
吕恒毅, 刘杨, 薛旭成. 遥感相机中时间延时积分电荷耦合器件积分级数的最优选择[J]. 光子学报, 2012, 41(6): 642-648.
- [5] Roques S, Jahan L, Rougé B, et al. Satellite attitude instability effects on stereo images[C] // 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, May 17-21, 2004, Montreal, Que., Canada. New York: IEEE, 2004: 477-480.
- [6] Liu H Q, Ma H M, Yan D J, et al. Image motion detection for space camera [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 080006.
刘海秋, 马慧敏, 闫得杰, 等. 空间相机像移探测方法的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 080006.
- [7] Tchernykh V, Dyblenko S V, Janschek K, et al. SmartScan: hardware test results for smart optoelectronic image correction for pushbroom cameras[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4814: 264-

- 272.
- [8] Fan C, Yi H W, Chen H F, et al. Research on the measurement method of the sub-pixel image motion based on optical correlator [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(2): 181-184.
樊超, 易红伟, 陈浩锋, 等. 基于光学相关的亚像元像移测量方法研究 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(2): 181-184.
- [9] Janschek K, Tehernykh V. Optical correlator for image motion compensation in the focal plane of a satellite camera [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2001, 34(15): 378-382.
- [10] Yi H W, Li Y C, Wen D S, et al. New measurement method of the sub-pixel image motion based on optical correlator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 718-722.
易红伟, 李英才, 汶德胜, 等. 采用光学相关的高精度亚像元像移测量新方法 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 718-722.
- [11] Grycewicz T J, Evans B E, Lau C S. Joint transform optical correlation applied to sub-pixel image registration [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5908: 59080Z.
- [12] Zalevsky Z, Rubner A, Garcia J, et al. Joint transform correlator with spatial code division multiplexing [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(28): 7325-7333.
- [13] Yi H W, Li Y C, He T B, et al. Sub-pixel image motion measurement of space camera based on JTC-CDMA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1635-1640.
易红伟, 李英才, 贺天兵, 等. 利用码分多址联合变换相关器实现亚像元像移测量 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1635-1640.
- [14] Javidi B, Wang J P. Thresholding effects on the performance of the binary nonlinear joint transform correlators [J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1347: 385-393.
- [15] Sudey J, Jr, Schulman J R. In-orbit measurements of Landsat-4 thematic mapper dynamic disturbances [J]. *Acta Astronautica*, 1985, 12(7/8): 485-503.
- [16] Wittig M E, van Holtz L, Tunbridge D E L, et al. In-orbit measurements of microaccelerations of ESA's communication satellite Olympus [J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1218: 205-214.
- [17] Toyoshima M, Araki K. In-orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the Engineering Test Satellite VI using laser communication equipment [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(5): 827-832.
- [18] Shi J F, Cheng P F, Yuan H, et al. Analysis and verification of effect of micro-vibration on space photoelectric payload imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0520001.
石进峰, 成鹏飞, 袁灏, 等. 微振动对空间光电载荷成像影响分析与验证 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0520001.