

离焦对光学相关法测量空间相机像移精度的影响

樊超¹ 李英才² 傅洪亮¹ 杨铁军¹

(¹ 河南工业大学信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001)
(² 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要 为了研究使用联合变换相关器(JTC)测量空间相机的亚像元像移时 CCD 离焦对像移测量精度的影响,基于菲涅耳衍射理论,推导了离焦引起的二次相位因子。分别通过计算机仿真和实验,研究了对 JTC 使用功率谱相减并以 0 值为门限二值化的处理方法时,离焦对像移测量精度的影响程度。结果表明,当离焦量小于透镜焦距的 5% 时,由此引起的像移测量误差不大于 10%,具有较好的稳健性;继续增加离焦量,则像移测量误差会呈非线性显著增加。研究结果为解决空间相机像移的在轨准确测量问题提供了有益的探索和参考。

关键词 遥感;像移;联合变换相关器;离焦

中图分类号 V448.21 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1028002

Influence of Defocusing on Measurement Accuracy of Image Motion of Space Camera

Fan Chao¹ Li Yingcai² Fu Hongliang¹ Yang Tiejun¹

¹ College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology,
Zhengzhou, Henan 450001, China

² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract To research the influence of the defocusing of CCD on the measurement accuracy when using the joint transform correlator (JTC) to measure the image motion of space camera, the quadratic phase factor induced by defocusing is deduced based on the theory of Fresnel diffraction. Then the measurement error caused by defocusing is studied by emulation and experiment respectively for the JTC which is processed by using the method of power spectrum subtraction and binarization with threshold of zero. The results show that, the measurement error is not more than 10% when the defocusing amount is within 5% of the focal length of the Fourier lens, and the robustness is good; if the defocusing amount is increasing, the measurement error will nonlinearly increase observably. The results of the research can supply provide useful reference for the real-time and online measurement of image motion.

Key words remote sensing; image motion; joint transform correlator; defocusing

OCIS codes 280.0280; 040.1490; 040.1520

1 引 言

空间相机利用卫星平台的运动推扫成像,相机拍照时焦面上被照物影像的运动与光生电荷包的转移间存在相对运动而带来的成像模糊及拖尾效应即为像移。像移的产生将会限制相机的分辨率,影响相机的成像质量。对于高分辨率空间相机来说,情况更是如此^[1~4]。为此,欧洲空间局 2004 年提出了

使用联合变换相关器(JTC)测量相机的像移,通过对安装在相机焦面上的辅助面阵图像传感 CCD 相继采集到的两幅时序图像进行相关运算,测量出相关峰的位移量,达到测量像移的目的^[5,6]。联合变换相关的原理是基于透镜的傅里叶变换性质,根据菲涅耳衍射理论,当使用平行相干光照射位于透镜前焦面上的物体时,只有像面准确位于透镜的后焦

收稿日期: 2011-03-31; 收到修改稿日期: 2011-05-05

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006)资助课题。

作者简介: 樊超(1976—),男,博士,副教授,主要从事空间遥感技术、信息光学和图像处理等方面的研究。

E-mail: anfan2003@gmail.com

面,才能接收到物面的傅里叶频谱。而在实际装调过程中,CCD 准确位于透镜的后焦面上通常是很困难的,因此研究离焦对 JTC 像移测量精度的影响,对于空间相机的像移测量和稳像具有重要的意义。

2 离焦引起的误差因子推导

JTC 包含两个完全相同的傅里叶变换单元,并且这两个变换单元的作用完全相同,只是空间光调制器(SLM)上加载的图像不同。考虑到空间相机的应用环境,这里使用单透镜单空间光调制器的 JTC 结构,CCD 第一次接收输入图像的联合功率谱,然后在数字控制单元的控制下,将联合功率谱放入输入面,再次由 CCD 接收相关输出。此外,这里的讨论不考虑噪声的影响。在图 1 中,设单位振幅的单色平面波垂直照射一个透射系数为 $t(x, y)$ 的 SLM,与输入屏(即 SLM)相距 z 处放置一块焦距为 f 的薄透镜 L,为便于讨论,忽略透镜材料的吸收、散射、透镜表面的反射以及透镜孔径大小等因素的影响。设 SLM 后的光场为 $E(x, y)$,透镜输入面的光场分布为 $E(x_1, y_1)$,透镜输出面的光场分布为 $E'(x_1, y_1)$,像方焦平面(即

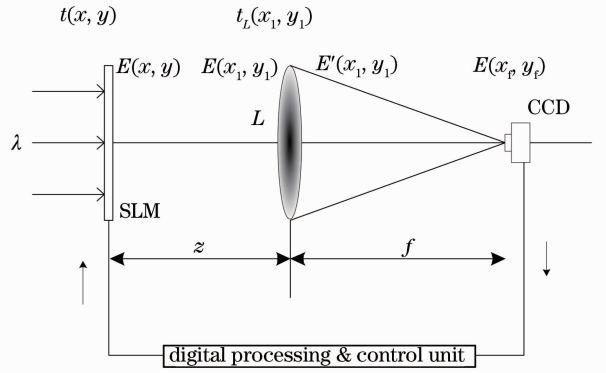


图 1 光电混合 JTC 结构图

Fig. 1 Structure of optoelectronic JTC

CCD)处光场分布为 $E(x_f, y_f)$ 。

首先研究透镜输入平面处光波场 $E(x_1, y_1)$ 与输出面的光场分布 $E'(x_1, y_1)$ 之间的关系。由于透镜的相位调制特性,输出平面与输入平面处光波场之间的关系为

$$E'(x_1, y_1) = E(x_1, y_1) \exp\left(-ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}\right), \quad (1)$$

而从透镜的输出面到像方焦平面,光波相当于经历了一次菲涅耳衍射:

$$E(x_f, y_f) = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda f} (x_f^2 + y_f^2)\right] \iint_{-\infty}^{\infty} E'(x_1, y_1) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda f} (x_1^2 + y_1^2)\right] \times \exp\left[-i2\pi \frac{x_1 x_f + y_1 y_f}{\lambda f}\right] dx_1 dy_1 = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda f} (x_f^2 + y_f^2)\right] \mathcal{F}\left\{E'(x_1, y_1) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda f} (x_1^2 + y_1^2)\right]\right\}. \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式有

$$E(x_f, y_f) = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda f} (x_f^2 + y_f^2)\right] \mathcal{F}[E(x_1, y_1)]. \quad (3)$$

在单位振幅的平面波垂直照射下,透过衍射屏(即 SLM)的光场复振幅分布 $E(x, y)$ 即等于 SLM 的透射系数 $t(x, y)$ 。故其频谱分布为

$$\mathcal{F}[E(x, y)] = \mathcal{F}[t(x, y)] = T(u, v), \quad (4)$$

式中 $u = x_f/(\lambda f)$, $v = y_f/(\lambda f)$ 。

该频谱分量从 SLM 传播到透镜的输入平面处,产生一个相位延迟 $\phi(u, v, z)$, 即

$$E_1(u, v) = T(u, v) \exp[i\phi(u, v, z)]. \quad (5)$$

在傍轴条件下, $\phi(u, v, z)$ 可表示为^[7]

$$\phi(u, v, z) = kz - \frac{k}{2} z \lambda^2 (u^2 + v^2). \quad (6)$$

由此可得透镜输入面处光波场的频谱分布为

$$\mathcal{F}[E(x_1, y_1)] = E_1(u, v) = T(u, v) \exp\left[ikz - i \frac{k}{2} z \lambda^2 (u^2 + v^2)\right]. \quad (7)$$

将(7)式代入(3)式可得

$$E(x_f, y_f) = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) \exp\left(ik \frac{x_f^2 + y_f^2}{2f}\right) \exp\left[ikz - i \frac{k}{2} z \lambda^2 (u^2 + v^2)\right] T(u, v) = \frac{1}{i\lambda f} \exp[ik(z + f)] \exp\left[ik \frac{x_f^2 + y_f^2}{2f} \left(1 - \frac{z}{f}\right)\right] T(u, v). \quad (8)$$

从(8)式可以看出,在单色平面波垂直照射下,透镜像方焦平面处的光场,除了一个一次相位因子和一个二次相位弯曲因子外,反映了SLM的透射系数的傅里叶变换,而SLM的透射系数主要由加载在它上面的输入图像的强度分布决定。因此,可以说透镜像方焦面处的光场反映了输入图像的傅里叶变换。若在像方焦面处放置平方律探测器,则探测到的功率谱为

$$I = E(x_f, y_f)E^*(x_f, y_f), \quad (9)$$

式中 $E^*(x_f, y_f)$ 为 $E(x_f, y_f)$ 的复共轭。

在联合变换相关器中,若 $z=f$,则(8)式的二次相位因子消失,此时在透镜的像方焦平面上得到输

入图像的准确傅里叶变换。当 $z \neq f$ 时,虽然存在一个与SLM的相对位置有关的二次相位因子,但由于在像方焦平面上放置的是CCD,根据(9)式,该二次相位因子并不影响CCD最终探测到的功率谱强度。也就是说,JTC中SLM可以放在透镜前任意位置,这对探测到的功率谱强度(或相关输出)并无影响。通常为了使变换器的结构紧凑,SLM放置在透镜前离其很近的位置上。

前面的分析和推导均是在CCD正焦情况下进行的,现假设CCD的离焦量为 Δd ,则根据菲涅耳衍射理论,(2)式可写为

$$E(x_f, y_f) = \frac{1}{i\lambda(f+\Delta d)} \exp[ik(f+\Delta d)] \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda(f+\Delta d)}(x_f^2 + y_f^2)\right] \iint_{-\infty}^{\infty} E'(x_1, y_1) \times \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda(f+\Delta d)}(x_1^2 + y_1^2)\right] \exp\left[-i2\pi\frac{x_1x_f + y_1y_f}{\lambda(f+\Delta d)}\right] dx_1 dy_1. \quad (10)$$

由于(10)式中积分前的相位因子并不影响CCD最终探测到的信号强度,因此,令其等于 c' 。由于离焦的出现,(10)式可写为

$$E(x_f, y_f) = c' \mathcal{F}\left\{E'(x_1, y_1) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda(f+\Delta d)}(x_1^2 + y_1^2)\right]\right\}. \quad (11)$$

将(1)式代入(11)式得

$$E(x_f, y_f) = c' \mathcal{F}\left\{E(x_1, y_1) \exp\left(-ik\frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}\right) \exp\left[ik\frac{x_1^2 + y_1^2}{2(f+\Delta d)}\right]\right\} = c' \mathcal{F}[E(x_1, y_1)] * \mathcal{F}\left\{\exp\left[-ik\frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}\right] \exp\left[ik\frac{x_1^2 + y_1^2}{2(f+\Delta d)}\right]\right\}, \quad (12)$$

式中 $*$ 表示卷积运算。将(7)式代入(12)式,并根据(9)式可知 $\exp[i\phi(u, v, z)]$ 并不影响CCD最终探测到的功率谱强度,因此令其等于 c'' 。这样,(12)式可写为

$$E(x_f, y_f) = c'c'' \mathcal{F}[t(x, y)] * \mathcal{F}\left\{\exp\left(-ik\frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}\right) \exp\left[ik\frac{x_1^2 + y_1^2}{2(f+\Delta d)}\right]\right\}. \quad (13)$$

此时,如果忽略(13)式中的相位项 $c'c''$,则输出面上的光场分布为

$$E(x_f, y_f) = \mathcal{F}[t(x, y)] * \mathcal{F}\left\{\exp\left(-ik\frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}\right) \exp\left[ik\frac{x_1^2 + y_1^2}{2(f+\Delta d)}\right]\right\} = \mathcal{F}\left\{t(x, y) \exp\left(-ik\frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}\right) \exp\left[ik\frac{x_1^2 + y_1^2}{2(f+\Delta d)}\right]\right\}. \quad (14)$$

由此可见,由于离焦而引入了一个二次相位误差项

$$\Phi_{\Delta d} = \exp\left[ik\frac{(x_1^2 + y_1^2)}{2(f+\Delta d)}\right] \exp\left[-ik\frac{(x_1^2 + y_1^2)}{2f}\right]. \quad (15)$$

同理,在第二次对联合功率谱作傅里叶变换时,离焦仍会引入如(15)式的一个二次相位误差因子。

3 离焦对JTC像移测量精度影响的数值仿真

为了研究离焦对联合变换相关法测量像移精度

的影响,对JTC系统作了如下假设:假设透镜的焦距 $f=200$ mm,单色平面波的波长 $\lambda=0.6328$ μm ,输入图像的大小为 128 pixel \times 128 pixel,输入屏的尺寸为 600 pixel \times 800 pixel,像元大小为 10 μm ,且透镜直径大于输入屏尺寸。假设 T 时刻辅助面阵图像传感CCD采集到的图像为 $r(x, y)$,并将其作

为参考图像。经过 Δt 时刻后,由于相机的推扫以及随机像移的影响, CCD 采集到的图像为 $t(x + \Delta x, y + \Delta y)$,并将其作为目标图像。与参考图像相比,目标图像的景物沿 x 方向和 y 方向分别移动了 $\Delta x, \Delta y$ 。

将这两幅图像同时输入 SLM,并使图像的中心位置分别位于 $(0, a)、(0, -a)$ 。当使用功率谱相减并以 0 值为门限二值化的方法对 JTC 进行处理时,仿真程序的流程框图如图 2 所示。

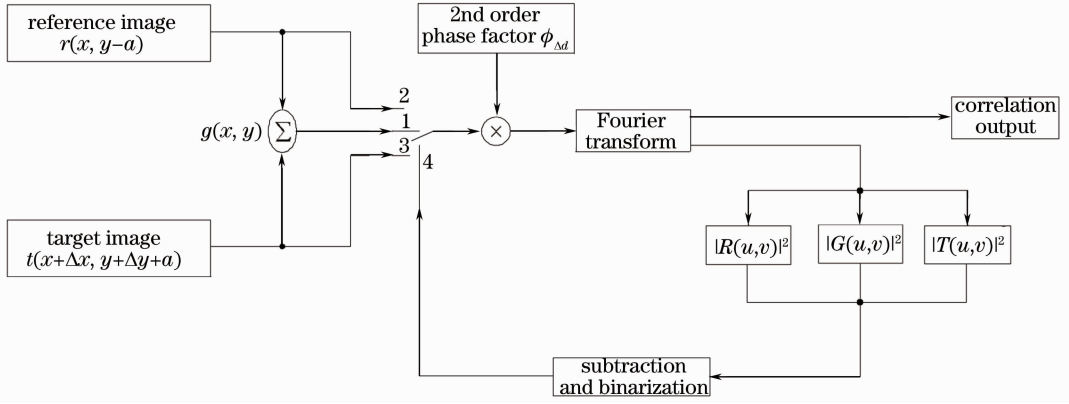


图 2 模拟流程框图

Fig. 2 Blocks diagram of simulation's flow chart

仿真步骤如下:

1) 将参考图像 $r(x, y - a)$ 和目标图像 $t(x + \Delta x, y + \Delta y + a)$ 同时读入 SLM,然后乘以二次相位因子 $\Phi_{\Delta t}$,将乘积做傅里叶变换,由 CCD 采集到联合功率谱,即

$$|G(u, v)|^2 = |\mathcal{F}\{[r(x, y - a) + t(x + \Delta x, y + \Delta y + a)]\Phi_{\Delta t}\}|^2. \quad (16)$$

2) 仅将参考图像 $r(x, y - a)$ 读入 SLM,然后乘以二次相位因子 $\Phi_{\Delta t}$,将乘积做傅里叶变换,由 CCD 采集到参考图像功率谱,即

$$|R(u, v)|^2 = |\mathcal{F}\{r(x, y - a)\Phi_{\Delta t}\}|^2. \quad (17)$$

3) 仅将目标图像 $t(x + \Delta x, y + \Delta y + a)$ 读入 SLM,然后乘以二次相位因子 $\Phi_{\Delta t}$,将乘积做傅里叶变换,由 CCD 采集到目标图像功率谱,即

$$|T(u, v)|^2 = |\mathcal{F}\{t(x + \Delta x, y + \Delta y + a)\Phi_{\Delta t}\}|^2. \quad (18)$$

4) 为削减自相关峰对像移测量精度的影响,将联合功率谱分别减去参考图像功率谱和目标图像功率谱,得到差值功率谱 $|G'(u, v)|^2$,即

$$|G'(u, v)|^2 = |G(u, v)|^2 - |R(u, v)|^2 - |T(u, v)|^2, \quad (19)$$

并将差值功率谱 $|G'(u, v)|^2$ 以 0 值为阈值对其二值化。

5) 将二值化的差值功率谱 $|G'(u, v)|^2$ 乘以二次相位因子 $\Phi_{\Delta t}$,然后作傅里叶变换,由 CCD 采集互相关输出峰,互相关信号中包含了像移信息 $\Delta x, \Delta y$ 。

6) 测量实际相关峰位置与理论相关峰位置

$(0, \pm 2a)$ 的偏移量,由此即可得到所要探测的像移值 $(\Delta x, \Delta y)$ 。

为了研究由于安装等原因引起的离焦 Δd 对像移测量精度的影响,在给定目标图像相对于参考图像亚像元像移量相同的情况下,对不同 Δd 时测量的结果列于表 1。为便于比较,这里将离焦量对透镜焦距进行了归一化,并借鉴了模式识别中常用的衡量参数^[8,9]。表中峰边比(PNR)定义为

$$R_{PN} = I_p / (\sum I_q / N), \quad (20)$$

式中 I_p 为相关峰强度, I_q 为输出面上小于相关峰强度 50% 的响应, N 为 I_q 的数目;半峰全宽(FWHM)定义为相关峰由最大降至一半时的宽度;识别力(ACR)定义为自相关峰强度与互相关峰强度之比;同时,定义测量误差相对比(MER)为

$$R_{ME} = \left| \frac{e_{def}}{e_f} \right| = \left| \frac{V_{m-def} - V_g}{V_{m-f} - V_g} \right|, \quad (21)$$

式中 e_{def} 和 e_f 分别为离焦和正焦时的测量误差, V_g 为给定值, V_{m-def} 和 V_{m-f} 分别为离焦和正焦时的测量值。图 3 分别给出了正焦及离焦 1%, 3% 和 5% 时的相关输出面。不难发现,离焦导致相关输出峰的弥散,使其由正焦时的点逐步扩散成弥散斑,并且离焦量越大,弥散斑分布得越开。而由于弥散斑的出现,使得互相关峰的能量降低,当离焦 10% 时,互相关峰的能量已不到正焦时互相关峰能量的 1/2。

从表 1 可以看出,使用 JTC 对亚像元像移进行测量时,在离焦 5% 的情况下,像移测量出现 10% 左右的变化,具有较好的稳健性。仿真结果表明,透镜

焦距误差 Δf 对像移测量精度的影响与离焦所引起的影响基本相同。

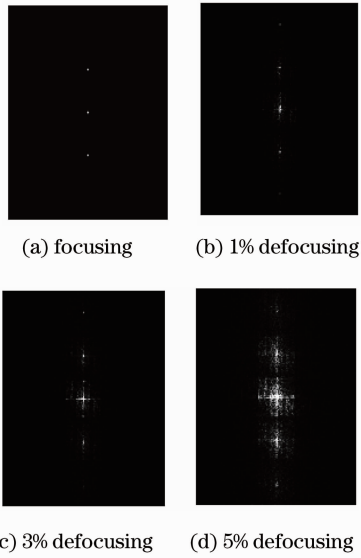


图3 不同离焦量下的相关输出

Fig. 3 Correlation outputs at different defocusing amounts

表1 离焦对像移测量精度的影响

Table 1 Influence of defocusing on measurement accuracy of image motion

$\frac{\Delta d}{f}$	Variation / %	PNR	FWHM / pixel	ACR	MER
1	15.18	1×1	6.36	1.03	
3	13.89	1×1	6.30	1.05	
5	11.25	3×2	6.08	1.08	
7	8.15	5×5	5.53	1.14	
10	4.95	9×9	4.15	1.25	

4 实验研究

为了对使用 JTC 测量像移的性能进行实验验证,构建了如图 4 所示的实验平台,这里所使用的 SLM 是英国 Scipher 公司中央研究实验室光学中心 (CRL Opto) 生产的 XGA3 型电寻址 TFT-LCD,其空间分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,像元间距 $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$,像元尺寸 $13 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。使用的 CCD 是意大利 DTA 公司生产的 EL-400ME,其分辨率为 $768 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,像元尺寸 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ 。在用 CCD 探测联合变换功率谱时,为了使 CCD 能够完整探测到零级功率谱,要求傅里叶变换透镜的焦距满足^[10]

$$f = \frac{N_2 d_2 d_1}{\lambda}, \quad (22)$$

式中 N_2 是 CCD 每一行的像元数, d_2 是 CCD 的像元尺寸, d_1 是 SLM 的像元间距, λ 为激光波长。当使用

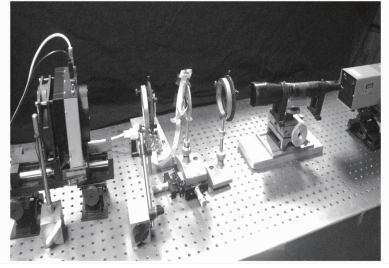


图4 JTC 实验装置

Fig. 4 Experimental setup of JTC

4 mW 的 He-Ne 激光器作为相干光源时,计算得到傅里叶透镜的焦距 $f=196.6 \text{ mm}$ 。再根据菲涅耳衍射原理和 SLM 的面板尺寸,最终选择了相对孔径为 1:5.3 的双胶合透镜作为傅里叶变换透镜。

根据第 3 节对离焦影响的分析,为了保证使用 JTC 测量像移的精度,需要仔细调整 CCD 的位置,尽可能使其位于傅里叶透镜的后焦面上。在调节 CCD 对焦的过程中,首先对 CCD 的位置进行粗调,利用 CCD 采集到的焦点光斑的形状和大小对其位置进行调整;然后对 CCD 进一步对焦,利用物体在频谱域的计算机全息图作为目标,将其输入 SLM,该全息图经透镜傅里叶变换后,由 CCD 接收全息输出图像。不断微调 CCD 的位置,直到在计算机监视器上清晰地显示了再现的原目标和与其共轭的图像,此时表明 CCD 已基本位于透镜的后焦面。

为了研究离焦对像移测量精度影响,将两幅大小为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 的图像分别作为目标图像和参考图像同时输入 SLM,如图 5(a)所示,由此得到的联合功率谱如图 5(b)所示,然后按第 3 节描述的步骤分别得到目标图像和参考图像各自独立的功率谱,并将功率谱相减运算后以 0 值为阈值二值化,由此得到的功率谱如图 5(c)所示,最后将处理后的功率谱再作一次傅里叶变换得到的相关输出如图 5(d)所示,其归一化能量分布如图 5(e)所示。由此可以看出,对功率谱使用相减并以 0 值为阈值二值化处理的方法可以有效减小自相关峰能量过强对测量精度的影响,此时两个互相关峰收缩成能量较为集中的亮斑,这对于提高像移测量的精度来说是极为有利的。仍然使用图 5(a)作为输入图像,调整 CCD 位置,使其出现 5% 和 10% 的离焦,此时得到的相关输出及归一化相关峰能量分布分别如图 6 所示。可以看出,随着离焦量的增加,相关峰的弥散程度越来越大,而其能量密度越来越小,当离焦 5% 时,相关峰能量已不到正焦时能量的 1/2,导致测量精度降低。当输入图像不变时,不断微调 CCD 的位

置,得到不同离焦量下的像移测量误差。结果表明,离焦量与测量误差间呈非线性变化,当离焦量在5%以内变化时,测量误差约变化10%,而随着离焦量的进一步增加,测量误差快速增大,其原因在于相

关峰的面积随之增加,而能量密度随之下降,使其由正焦时的汇集点逐渐扩散成弥散斑,相关峰质心的测量精度随之下降,导致像移测量误差增加。该实验结果与仿真得到的结论基本一致。

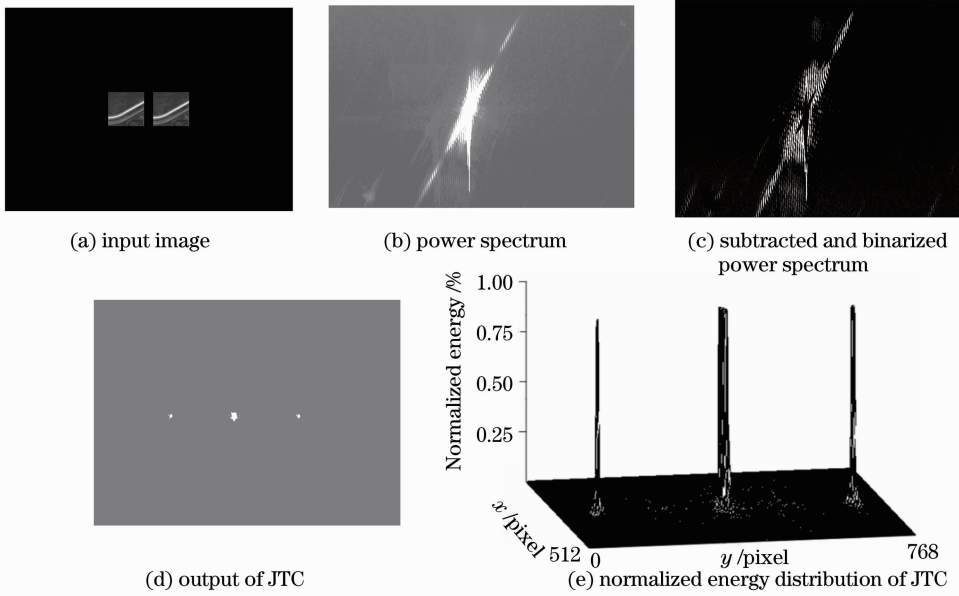


图 5 输入图像、功率谱及相关输出

Fig. 5 Input image, power spectrum and output of the correlator

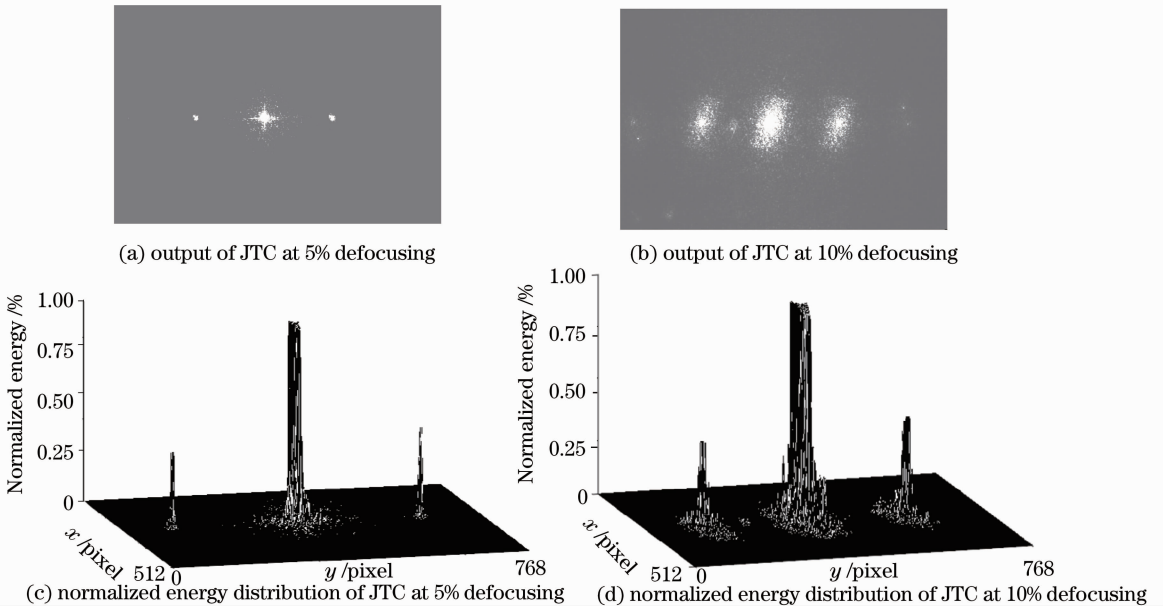


图 6 不同离焦量下的相关输出

Fig. 6 Correlation outputs of JTC at different defocusing amounts

5 结 论

在使用 JTC 测量空间相机的亚像元像移时, CCD 准确位于傅里叶透镜的后焦面上通常是很困难的。通过理论研究推导了离焦所引起的相位误差,并分别通过仿真和实验研究了离焦对像移测量

精度的影响。结果表明,当离焦量小于透镜焦距的5%时,像移测量误差小于10%,具有较好的稳健性;如果继续增大离焦量,则像移测量误差会显著增加。因此,在使用 JTC 测量图像间的亚像元像移时,要尽量保证 CCD 位于透镜的后焦面位置,以得

到较高的测量精度。本研究为解决空间相机像移的在轨准确测量问题提供了有益的探索和参考。

参 考 文 献

- 1 Gong Dun, Wang Hong, Tian Tiejun. Temperature effect on imaging performance of three-line CCD satellite camera and temperature indicators affirmed[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2017~2021
 巩盾, 王红, 田铁印. 温度对星载相机的影响和温控指标的制定[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2017~2021
- 2 Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao *et al.*. Analysis of influence of attitude variation on visible characteristics of space target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2748~2752
 袁艳, 孙成明, 张修宝等. 姿态变化对空间目标可见光特性的影响分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2748~2752
- 3 R. Sylvie, J. Loic, R. Bernard *et al.*. Satellite attitude instability effects on stereo images [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004, **3**: 477~480
- 4 S. Lee, J. W. Alexander, M. Jeganathan. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground[C]. *SPIE*, 2000, **3932**: 150~157
- 5 K. Janschek, V. Tchernykh, S. Dyblenko *et al.*. Compensation of focal plane image motion perturbations with optical correlator in feedback loop [C]. *SPIE*, 2004, **5570**: 280~288
- 6 V. Tchernykh, S. Dyblenko, K. Janschek *et al.*. Airborne test results for a smart pushbroom imaging system with optoelectronic image correction [C]. *SPIE*, 2004, **5234**: 550~559
- 7 Liu Jifang. Modern Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. 80~84
 刘继芳. 现代光学[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004. 80~84
- 8 A. Alsamman. Spatially efficient pseudo-random phase encoded JTC for fast target recognition [C]. *SPIE*, 2005, **5816**: 252~257
- 9 Chen Fanghan, Miao Hua, Chen Yu *et al.*. Target recognition based on wavelet multiscale product [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1224~1226
 陈方涵, 苗华, 陈宇等. 基于小波多尺度积的目标识别[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1224~1226
- 10 M. B. Philip, C. T. Frederic, B. David *et al.*. Optical and electronic design of a hybrid digital-optical correlator system [J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(1): 32~40