文章编号 1674-2915(2009)03-0218-07

联合变换相关器像移测量试验系统设计

葛任伟[1,2],吴清文[1],王 运[1,2],陈立恒[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 研究生院,北京 100039)

摘要:为了测量由于卫星姿态不稳定或振动等原因引起的空间相机亚像元像移,设计了基于联合变换相关器的像移测量试验系统,提出了像移测量方法。阐述了该测量方法的数学原理,给出了面阵CCD的安装位置以及输入图像序列的获取方法。根据相关参数确定了试验系统的傅里叶透镜结构和参数,最终设计了试验系统。应用线性插值和像元合并方法获得具有亚像元像移的输入图像。试验结果表明,像移测量的精度不随景物的内容而变化,测量得到的像移误差均方根值<0.2 pixel。

关 键 词:联合变换相关器;像移测量;傅里叶变换透镜
中图分类号:V475.3; O438.2 **文献标识码**:A

Design of test system for image motion measurement based on joint transform correlator

GE Ren-wei[1,2], WU Qing-wen[1], WANG Yun[1,2], CHEN Li-heng[1]

(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: To measure the sub-pixel image motion of a space camera caused by the satellite attitude instability or vibration, a test system for image motion measurements based on a joint transform correlator was designed, and the image motion measurement method was presented. After deducing the mathematics principles of the measuring method, the position of a matrix CCD on the focal plane and the method of getting input images were presented. The Fourier lens structure and parameters in the test system were determined by related parameters, then a test system was designed. Finally, an input image with sub-pixel image motion was obtained by a linear interpolation and pixel combination method. The results show that the error does not change with different scenes of input images, and the error RMS of image motion is less than 0.2 pixel.

Key words: joint transform correlator; image motion measurement; Fourier transform lens

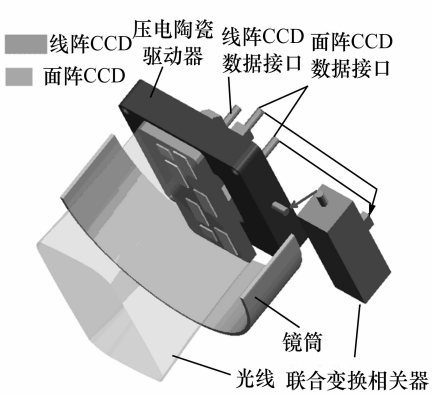
收稿日期:2009-03-11;**修订日期**:2009-05-13

1　引　言

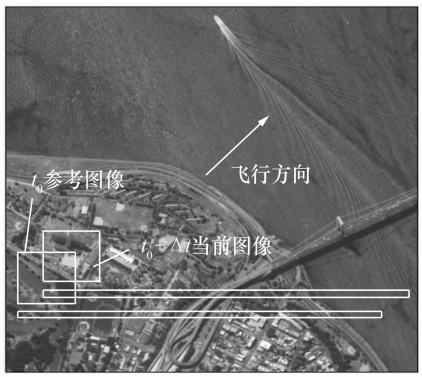
空间相机对地成像时,会由于振动、卫星平台的运动及相机摆动等使相机在曝光时被照物影像与感光元件间存在相对运动,以此带来成像模糊及拖尾效应,即像移。像移的存在极大地影响了相机的成像质量,使图像分辨力明显下降,因此必须进行像移补偿。传统的像移计算方法是通过对相机运动参数和存在于相机控制器中的其他参数进行计算得到像移速度值。实际情况下,卫星平台飞行姿态变化(俯仰、翻滚、偏航)、轨道速高比变化、地球自转、星上活动部件颤振等因素都会导致相机在积分成像过程中产生附加像移。虽然这种附加像移量很小,但是随着相机焦距增大和积分级数的增加(延迟积分 TDICCD 器件),相机调制传递函数(MTF)和分辨率会明显降低,导致图像质量恶化;而高频扰动(振动或抖动)也会引起相机 MTF 的下降(引起图像模糊);低频扰动还会导致图像出现几何变形;同时,由于卫星的空间运行环境复杂,使得这种附加像移具有随机性,基本上没有规律可循。要解决这个问题,可以采取增加卫星姿态控制的稳定性,同时减小由动量轮或其它因素引起的卫星振动的方法,但这种方法会大幅度增加卫星的费用、尺寸和重量。如果能够对空间相机成像过程中的像移进行实时在轨测量,然后采用一定的补偿方法对像移进行补偿校正,将大大节约成本;同时因为相机内部像移补偿机构的惯性矩一般均较小,这样做也有利于提高卫星平台的稳定性。本文基于联合变换相关器,设计了一种像移测量试验系统,以对安装在相机焦面上的辅助面阵 CCD 采集到的具有重叠地物景象的连续图像序列进行相关运算,以计算像移大小[1,2]。

2　空间相机像移在轨实时补偿系统

基于相关器的像移测量补偿系统如图 1(a)所示,线阵 CCD 部分是相机的有效载荷系统,面阵CCD 与联合变换相关器组成像移测量系统,压电陶瓷驱动器根据相关器测量像移大小进行实时补偿。线阵 CCD 与面阵 CCD 处于同一焦平面,当相机沿图 1(b)中箭头方向飞行时,t_0时刻面阵 CCD 得到的图像作为参考图像,$t_0 + \Delta t$ 时刻,面阵 CCD 再次对地面成像,得到当前图像,控制面阵 CCD 的时序可以得到两幅具有重叠信息的图像,对这两幅图像进行相关运算,可以求出像移大小。



(a) 像移测量补偿系统
(a) Image motion measuring and compensating system



(b) 图像运动补偿
(b) Image motion compensation

图 1　基于联合变换相关器像移补偿方法示意图
Fig. 1　Schematic diagrams of image motion compensation based on joint transform correlator

在图像相关运算过程中,需要进行大量的计算(二维傅里叶变换)。为了达到实时性,用现在的数字信号处理(DSP)器件很难满足速度要求,因此考虑采用能以光速进行傅里叶变换的联合变换相关器,来完成图像相关运算。

3 联合变换相关器测量像移的原理

联合变换相关器测量像移的基本原理[4]是应用衍射原理和光学透镜的傅里叶变换功能来完成图像的相关运算,根据相关峰的位置提取像移大小。首先,将参考图像与当前图像同时输入空间光调制器(Space Light Modulator,SLM),在第一个傅里叶变换平面上用 CCD 记录联合变换功率谱。联合变换功率谱再次输入到 SLM,经第二次傅里叶变换后,获得一对相关峰,相关峰值的位置信息包含了参考图像和当前图像的像移量,提取相关峰值的位置与理论位置相减即可得到相移量大小。

中心点分别为$(0,-a)$、$(0,a)$的参考图像$f(x,y)$和当前图像$g(x,y)$输入傅里叶光学处理单元(OFPU)的 SLM 中,且$g(x,y)$相对$f(x,y)$在x、y方向分别移动ΔX、ΔY,因此相关器的输入$E_{fg}(x,y)$为:

$$E_{fg}(x,y)=f(x+a,y)+g(x-a-\Delta X,y-\Delta Y)$$

经过一次傅里叶变换后得到频谱函数$E_{fg}(p,q)$:

$$E_{fg}(p,q)=\exp(\mathrm{i}2\pi pa)\times F(p,q)+\exp[-\mathrm{i}2\pi(p(a+\Delta X)+q\Delta Y]\times G(p,q)$$

其中$F(p,q)$、$G(p,q)$为$f(x,y)$、$g(x,y)$的傅里叶变换,用满足平方律转换器的 CCD 探测得到联合功率谱:

$$|E_{fg}(p,q)|^2=F(p,q)\times F^*(p,q)+\exp[\mathrm{i}2\pi(p(2a+\Delta X)+q\Delta Y)F(p,q)\times G^*(p,q)+G(p,q)\times G^*(p,q)+\exp[-\mathrm{i}2\pi(p(2a+\Delta X)+q\Delta Y)F^*(p,q)\times G(p,q)$$

这里$*$表示复共轭。将联合功率谱$|E_{fg}(p,q)|^2$再次送入到 OFPU 的 SLM 中,再次进行傅里叶变换,得到相关输出:

$$C_{fg}(x,y)=f(x,y)\odot f(x,y)+f(x-2a-\Delta X,y-\Delta Y)\odot g(x-2a-\Delta X,y-\Delta Y)+g(x,y)\odot g(x,y)+g(x+2a+\Delta X,y+\Delta Y)\odot f(x+2a+\Delta X,y+\Delta Y)$$

上式中$\odot$表示相关运算,第一项与第三项为互相关项,可以看出互相关项包含了像移信息ΔX、ΔY,由相关运算的性质可以知道,$C_{fg}(x,y)$在$(x\pm 2a\pm\Delta X,y\pm\Delta Y)$处出现峰值,因此只要用质量中心算法测量出互相关峰相对于理想位置$(0,\pm 2a)$的偏移量,就能得到需要的像移大小ΔX、ΔY。

4 联合变换相关器试验系统的设计

根据以上理论分析设计了联合变换相关器并进行了像移测量实际验证,考虑星上应用的最终需求,所设计的联合变换相关器体积不大,且力求质量最小,从而要求傅里叶透镜组和光束的准直扩束系统的焦距不宜过长,体积不应过大。此外,还要尽量减小所使用激光器的体积。综上考虑设计的光机结构如图 2 所示。

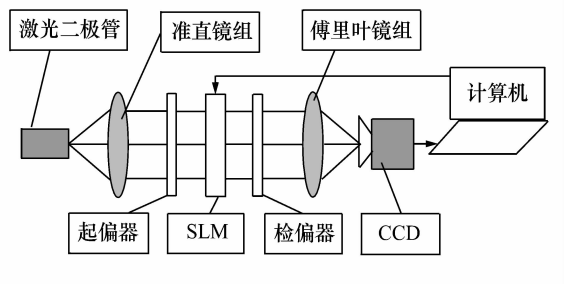


图 2 联合变换相关器结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of joint transform correlator

由激光器发出的激光束经准直镜组准直扩束,经过起偏器,形成一束平面偏振光,作为空间光调制器的读出光,然后即可进行试验。试验过程为:第一步,由计算机同时向 SLM 输入当前图像和参考图像;第二步,CCD 直接在傅里叶透镜组后焦面处接收联合变换功率谱,并将采集到的信息送入计算机中;第三步,在计算机中对记录的联合变换功率谱进行二值化处理;第四步,处理后的联合功率谱再输出显示到 SLM 上,经光束读出后,在傅里叶透镜组的后焦面处用 CCD 接收相关结果,送入计算机中进行显示和判读。

4.1 试验器件的选择及其相关参数

联合变换相关器中主要的部件包括激光光源、空间光调制器、光电耦合器件(CCD)以及傅里叶透镜等,各器件的参数以及傅里叶透镜的设计结果如下:

选择工业用激光平行光管作为激光光源,管

芯功率为30 mW,输出光束为40 mm,经准直后的发散角 <2 μrad,激光光束较均匀。

空间光调制器具有较高的分辨率,利用该器件不但可以记录光学系统的物像,也可以把计算的参考目标输入到液晶中去,以实现光学相关。空间光调制器是实现像移实时测量的核心器件,本文选用日本 Sony 公司的 TSLM023 液晶光阀,相关参数如表 1 所示。

表 1　空间光调制器参数

Tab. 1　Parameters of spatial light modulator

型号	对角尺寸	分辨率	像元大小	对比度	开口率	透过率
TSLM023	33 mm	1 024 × 768	26 μm × 26 μm	400∶1	67%	23%

光电耦合器件能够完成光信息到电信息的转换,因此选用 CCD 摄像机作为光电联合变换相关系统中的联合功率谱以及相关峰的提取器件,应用这一器件的同时还解决了由频率谱到功率谱的转化问题。选用日本 Sentech-STC-E43A 相机作为 CCD 探测器,具体参数如表 2 所示。

表 2　STC-E43A 相机参数

Tab. 2　Parameters of camera STC-E43A

型号	分辨率	像元大小	快门时间	功耗	帧频
E43A	768 × 494	6.35 μm × 4.58 μm	1/60 ~ 1/100 000	< 1.8 W	60 Hz

4.2　傅里叶变换透镜组的设计

傅里叶透镜的主要参数是相对孔径和焦距,其相对孔径决定其空间带宽积的大小,即影响其能接收信息量的大小。试验中,由于在傅里叶变换透镜的后焦面上用的 CCD 接收的是功率谱,并且用平行相干光照明,因此可以把物体放在傅里叶透镜前的任一位置,不严格要求物体必须位于傅里叶透镜的前焦平面上[3]。

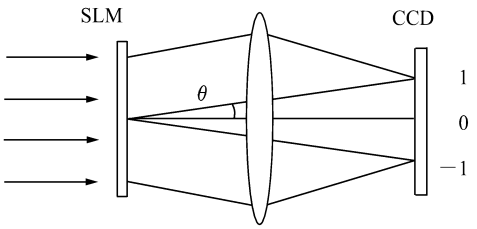


图 3　CCD 面上的 0, ±1 级干涉谱

Fig. 3　0 and ±1 order power spectrum on CCD

如图 3 所示,有用的空间光调制器的功率谱是零级谱,根据衍射理论可以计算出所需透镜口径的大小。根据衍射公式(1)和空间光调制器像素的大小计算出衍射角 θ,再由 θ 的大小根据公式(2)计算出接收零级和一级谱所需透镜口径的大小。

$$a\sin(\theta) = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots \pm n), \tag{1}$$

$$D \geqslant N + 2d\tan(\theta), \tag{2}$$

式中 N 为空间光调制器的结构尺寸。由于 θ 很小,则有 $\theta = \sin(\theta) = \tan(\theta)$,其中 d 的大小是任意值。为了减小试验装置的结构,方便试验装调,取 $d = 100$ mm。将空间光调制器的行列参数代入公式(1)和(2)中计算傅里叶透镜组通光孔 D 的值,结果如表 3 所示。

表 3　傅里叶透镜口径 D 的取值范围

Tab. 3　Diameter ranges of Fourier transform lens

λ	行方向(H)	列方向(V)
635 nm	26.4 mm	19.8 mm
	23 μm	23 μm
$D \geqslant$ mm	26.4 + 2 × 100 × 0.024 mm	19.8 + 2 × 100 × 0.024 mm

取 $d = 100$ mm,傅里叶透镜的孔径应该 ≥ 31.2 mm。由于是平行光照射空间光调制器,所以傅里叶透镜的孔径必须大于等于空间光调制器

的对角线尺寸,即 $D \geqslant 33$ mm。

同样为了能在面阵 CCD 上接收到 ±1 级频谱,根据衍射理论和实际面阵 CCD 的大小,可以计算出所需要的傅里叶透镜的焦距范围。透镜的焦距大,衍射条纹变粗,若获得多的信息量,CCD 的尺寸也要增大;而焦距变小,衍射条纹变密集,此时需要增加 CCD 的分辨率。计算数值如表 4 所示。

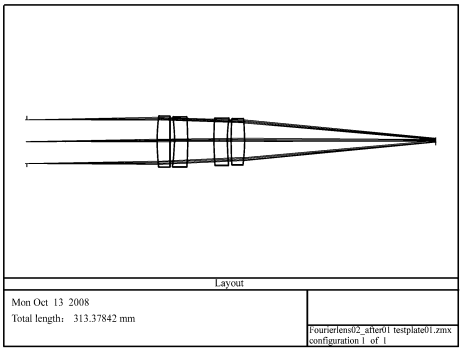
表 4 傅里叶透镜焦距的取值范围

Tab. 4 Focal lengths ranges of Fourier transform lens

λ	行(H)	列(V)
635 nm	6.35 mm	4.58 mm
$f \geqslant$	173.2 mm	145.2 mm

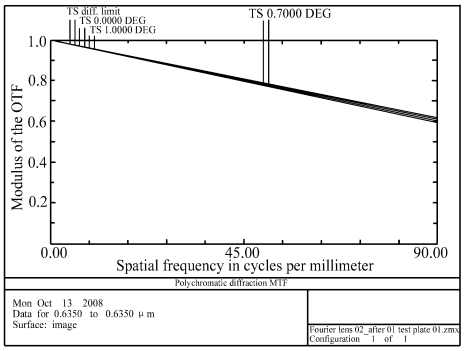
傅里叶变换透镜的典型结构主要有两类:单组元式结构与对称型结构。前者可使球差得到很好的校正,且结构简单,但由于轴外像差的存在,其视场角和相对孔径偏小。出于试验的目的并考虑联合变换相关器元件尺寸的限制,要求傅里叶变换透镜具有较大的相对孔径,故本设计采用四组元对称型结构,焦距为 175 mm,通光孔径为 33 mm,输出面直径为 6 mm。设计的透镜组结构和像质如图 4 所示。

图 4 表明,所设计的傅里叶变换透镜的几何像差、波像差均满足设计需要。系统全视场传递函数达到衍射极限,全视场波像差均在 $\lambda/10$ 以内。结果表明,所设计的四组元对称型傅里叶透镜的像质优良。



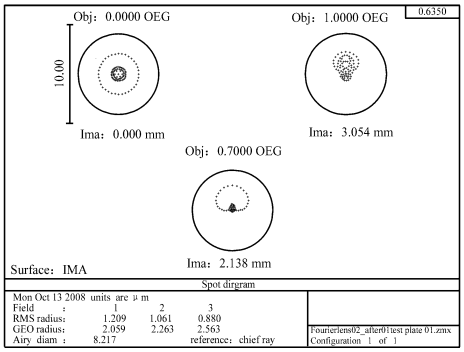
(a) 傅里叶透镜

(a) Fourier transform lens



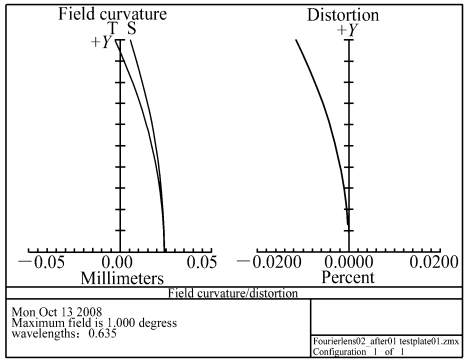
(b) 传递函数

(b) Modulation Transfer Function (MTF)



(c) 点列图

(c) Spot diagram



(d) 场曲和畸变

(d) Field curvature and distortion

图 4 傅里叶透镜结构及像质

Fig. 4 Structures and image quality of Fourier transform lens

5　联合变换相关器试验结果

最终设计的试验系统如图 5 所示。通过线性插值和像元合并的方法得到含有亚像元像移的输入图像,同时在输入图像中加入高斯白噪声模拟低信噪比的情况。图 6 为测试时具有代表性的 3 幅图像,分别为海边道路、城市和发射场。

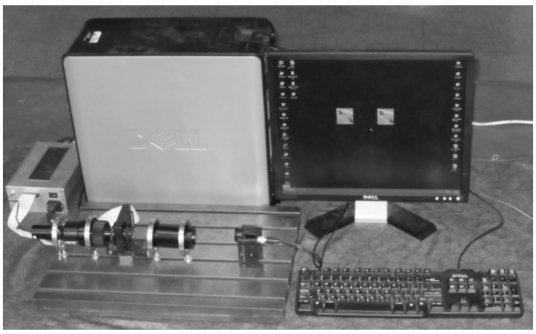


图 5　试验系统实物图

Fig. 5　Test equipment

图 7 给出测试过程中上述 3 幅图中的一次相关运算得到的联合功率谱[5]、相关输出以及相关输出峰三维显示。大量试验结果表明:(1)对不同景物内容的图像进行测试,像移测量的精度不随景物的内容而变化,测量得到的像移误差均方根值基本相同,从试验的角度证明了该方法的可行性;(2)随着输入图像间像移量的增加,相关输出中互相关峰的能量逐渐减弱,并且这种变化几乎成线性关系。这是因为增大像移相当于削弱了 2 幅图像的相似性,导致相关峰强度衰减直至消失。(3)多次测量的统计结果表明,像移测量误差均方根值 <0.2 pixel。

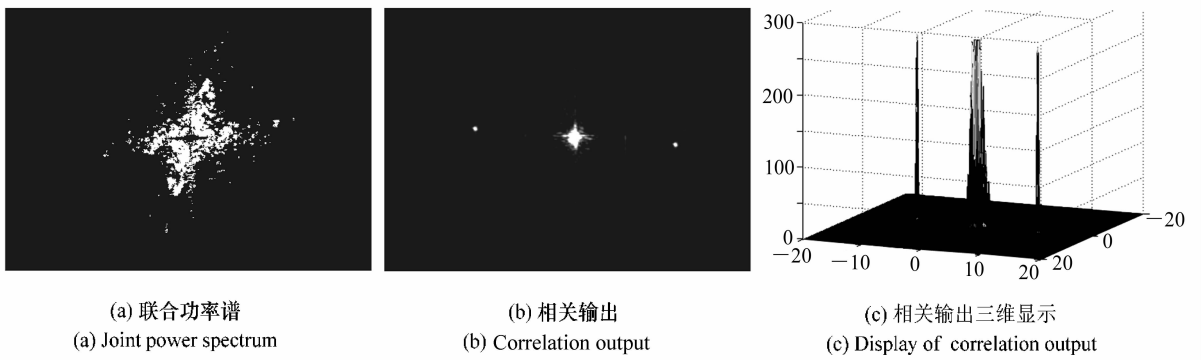
(a) 海边道路
(a) Road beside the ocean

(b) 城市
(b) City

(c) 发射场
(c) Launch pad

图 6　试验输入图像

Fig. 6　Input images for test



(a) 联合功率谱
(a) Joint power spectrum

(b) 相关输出
(b) Correlation output

(c) 相关输出三维显示
(c) Display of correlation output

图 7　试验结果

Fig. 7　Test results

6 结 论

基于联合变换相关器的像移测量方法具有实时、快速、准确的特点。本文介绍了联合相关器进行像移测量的基本原理,并设计了试验系统进行试验验证,得到了误差均方根值 <0.2 pixel 的测试结果。

系统中,面阵 CCD 的读出时间以及空间光调制器的响应时间占据重要的部分,如果提高面阵 CCD 的抽样频率以及空间光调制器的响应时间,提高整个系统的测试频率,即可准确测量卫星平台上因其他因素引起的像移。用插值的方法可得到线阵 CCD 行转移周期间的像移量,进而能够用压电陶瓷驱动装置对图像进行实时补偿或通过事后处理得到高质量图像。该装置由于体积小、质量轻、计算速度快,特别适合于高分辨率空间相机的像移测量,进而补偿其像移量。

参考文献:

[1] 满益云,陈世平. 一种实时测量卫星像移的新方法[J]. 航天返回与遥感,2003,9(3):24-29.
MAN Y Y,CHEN SH P. An innovative method for the real time measurements of image shift due to the motion of the satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*,2003,24(3):14-29. (in Chinese)

[2] JANSCHEK K,TCHERNYKH V,DYBLEENKO S. Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera[J]. *Control Eng. Pract.*,2007(15):333-347.

[3] 王晶晶,王波,王文生,等. 新型联合变换相关器光学系统设计[J]. 光电工程,2006,33(4):116- 121.
WANG J J,WANG B,WANG W SH,*et al*.. Optical system design of new-type joint transform correlator[J]. *Opto-Electronic Eng.*,2006,33(4):116-121. (in Chinese)

[4] 胡文刚,王永仲,华文深. 光学相关器的研究进展及军事应用[J]. 光学技术,2006,32:179-181.
HU W G,WANG Y Z,HUA W SH. Research and military application of optical correlator[J]. *Opt. Technol.*,2006,(32):179-181. (in Chinese)

[5] FRANCIS T S Yu,CHENG F,NAGATA T,*et al*.. Effects of fringe binarization of multiobject joint transform correlation [J]. *Appl. Optics*,1989,28(15):2988-2990.

作者简介:葛任伟(1980—),男,河南新乡人,博士研究生,主要研究方向为空间相机稳像技术。
E-mail:gerenwei080808@163.com