

# 采用 CCD 错位成像技术提高图像质量

李亚鹏<sup>1,2</sup> 何斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了克服现有电荷耦合器件(CCD)错位成像实现方法结构复杂、对移位精度要求苛刻等缺点,提出并实现了利用高精度二维平移台对单个 CCD 相机整体二维移位,对一定物距远处靶标成像。采用三次 B 样条插值、交错重组,对得到的具有既定相互位移关系的多幅相互错位半个像元的低分辨率图像进行重建,得到高分辨率图像。采用刃边法估算点扩展函数,对重建高分辨率图像进行图像复原,得到最终高分辨率图像。结果表明,采用错位成像,图像目视视觉分辨率提高了 1.4 倍,图像混叠效应降低,图像复原将调制传递函数面积(MTFA)由 0.1577 提高到 0.2937。实验表明,错位成像技术能提高图像分辨率,降低图像混叠,增强图像质量,图像复原可以有效补偿重建的高分辨率图像的调制传递函数(MTF),解决了错们成像中重建图像分辨率提高但 MTF 下降的问题。

**关键词** 成像系统;分辨率;电荷耦合器件错位成像;图像重建与复原;调制传递函数

中图分类号 TN386.5

文献标识码 A

doi: 10.63788/AOS201535.0211001

## Improving Image Quality by Using CCD Subpixel Imaging

Li Yapeng<sup>1,2</sup> He Bin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to overcome the disadvantages in existing charge coupled device (CCD) subpixel imaging realization ways, such as complex structure, high subpixel precision and so on, a subpixel imaging method with single CCD camera by using high precision two-axis translation table to imaging the target at a certain distance is proposed and implemented. The multiple low-resolution images, which have half-pixel shift with each other attained by photographing target in fixed object distance using the proposed method, are interpolated and reconstructed based on cubic B spline interpolation and interlacing, and high resolution images are achieved. Then, point spread function is estimated by using knife edge method, and final high resolution image is got after performing image restoration to above reconstructed high resolution image. Results show that visual spatial resolution is improved to 1.4 times and image aliasing effect is reduced by using subpixel imaging and modulation transfer function area (MTFA) is increased to 0.2937 from 0.1577 by performing image restoration. Experiment demonstrates that subpixel imaging can enhance spatial resolution, reduce image aliasing and improve image quality. Image restoration can effectively compensate modulation transfer function (MTF) of reconstructed high resolution image, which solves the problem of spatial resolution enhancement but MTF reduction in subpixel imaging.

**Key words** imaging systems; definition; charge coupled device subpixel imaging; image reconstruction and restoration; modulation transfer function

**OCIS codes** 110.4100; 110.4155; 120.0280; 040.1250; 100.6640

收稿日期: 2014-08-07; 收到修改稿日期: 2014-08-24

基金项目: 国家 863 计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 李亚鹏(1987—),男,博士研究生,主要从事光电成像技术方面的研究。E-mail: liyp1123@163.com

导师简介: 何斌(1961—),男,博士,研究员,主要从事空间遥感图像处理技术方面的研究。E-mail: hbemail@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

## 1 引 言

电荷耦合器件(CCD)被广泛应用于航空和航天遥感成像中,随着遥感应应用技术的发展,人们对遥感相机的分辨力提出越来越高的要求<sup>[1]</sup>。采用传统方法提高遥感相机分辨力,如增大光学系统焦距、减小 CCD 像元尺寸等,将造成卫星相机体积、质量成倍增长,光机结构难以实现,对卫星装载平台要求更苛刻<sup>[2]</sup>。近年来,CCD 错位成像技术备受国内外关注。CCD 错位成像技术能在不改变光学系统焦距和 CCD 像元尺寸的前提下,提高相机空间分辨力,因此,深入研究和探索 CCD 错位成像技术,对提高卫星相机、尤其是红外相机空间分辨力、实现卫星小型化意义重大。

采用线阵 CCD 实现错位成像,主要有棱镜分光法和焦面集成法,法国 SPOT5 卫星、德国 BIRD 卫星红外遥感器 HSRS 等都使用了类似的技术<sup>[3-6]</sup>,这种方法需要定制特殊排列的 CCD,因而成本高,周期长。采用面阵 CCD 实现错位成像,主要途径有两种:调整光学元件改变光路<sup>[7-8]</sup>和改变 CCD 探测器的位置<sup>[9]</sup>。这两种方法都需要精密控制部件实现对光学元件或 CCD 探测器的位置调整,因此,结构复杂、对移位精度要求高,美国前视红外系统公司的 AN/AAQ-22 Star SAFIRE 和 BRITE Star 系统利用压电驱动光学元件的微扫描技术,提高了系统分辨力和稳定性<sup>[10]</sup>。

在国内,已经有很多关于 CCD 错位成像技术的理论和后期高分辨率图像重建算法的研究<sup>[11-14]</sup>。在 CCD 错位成像技术应用到航空航天遥感成像系统中之前,先在地面上通过实验验证 CCD 错位成像技术的实际效果是非常关键的,也对应用于航空航天遥感成像具有工程指导意义。在实验室验证 CCD 错位成像技术,若使用线阵 CCD,则需使用分光棱镜或定制特殊排列的线阵 CCD,且需要额外的推扫装置实现线阵 CCD 推扫成像。使用面阵 CCD 则可以避免上述不足,但现有的面阵 CCD 错位成像实现方法需要复杂的方案重新设计光学系统或焦平面组件,系统对移位精度要求苛刻、结构复杂、实现难度大。

针对上述问题,本文提出并实现了一种基于高精度二维平移台的面阵 CCD 错位成像实现方法,得到了多幅具有相互亚像素级位移的低分辨率图像。按照相互位移关系,对多幅低分辨率图像进行插值、融合、复原等处理,得到最终高分辨率图像,并且,从目视视觉分辨力及调制传递函数(MTF)等客观评价角度对图像质量进行了评价。

## 2 CCD 错位成像技术

### 2.1 面阵 CCD 错位成像技术

面阵 CCD 错位成像技术是通过使用一定的方法使同一个 CCD 按照一定的移位方式对同一场景成像,移位距离小于 CCD 像元尺寸,每移位一次,就成像一次,然后对得到的多幅图像按照相互之间的移位关系进行插值、融合及复原处理,最终得到高分辨率图像。考虑常见的方型像元,像元尺寸为  $p \times p$ 。如图 1 所示,常用的面阵 CCD 错位成像模式有两种:对角错位和四点错位,其移位步长均为半个 CCD 像元尺寸的距离,即  $p/2$ 。

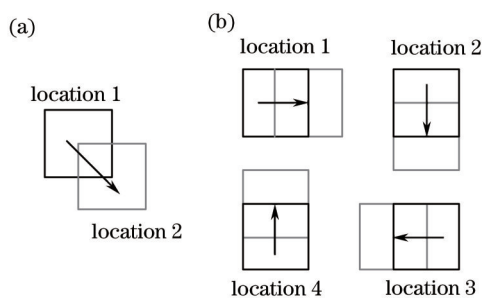


图 1 (a)对角错位和(b)四点错位

Fig.1 (a) Diagonal subpixel and (b) four-point subpixel

面阵 CCD 错位成像实际上是增加了采样点的个数、减小了采样间隔,从而提高了采样频率,由奈奎斯特定理,尽管采样有重叠区域,也能一定程度上降低混叠,提高图像质量。

### 2.2 基于平移台的 CCD 错位成像实现原理

如图 2 所示,如果相机光学系统焦距为  $f$ ,CCD 像元尺寸为  $p$ ,靶标的物距为  $l$ ,每个像元经过光学系统在靶标上投影的距离为  $D$ ,依据光学成像原理,

$$\frac{p}{D} = \frac{f}{l} \Rightarrow D = \frac{p \times l}{f}, \quad (1)$$

即每个尺寸  $p \times p$  的像元,对物面上相应  $D \times D$  区域成像,像元输出灰度值与对应成像区域的辐射亮度成比例。由 2.1 节错位成像原理可知,保持靶标不动,在垂直于光轴的平面上,整体移动相机  $D/2$  的距离,就可以实现错位半个像元对靶标成像。

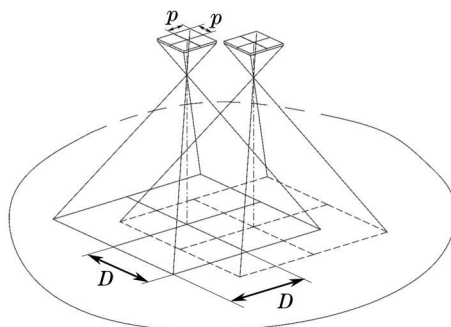


图 2 错位成像原理

Fig.2 Principle of subpixel imaging

传统的错位成像实现方法,保持光学系统不变,移动 CCD 探测器,则实现错位半个像元成像需要移动  $p/2$  距离,由于 CCD 像元尺寸为微米级,对位移精度要求较高,一般需要用压电陶瓷来实现。采用提出的方法实现错位半个像元成像,需要移动  $D/2$  距离,将移动距离放大了  $l/f$  倍,通常为几百微米,大幅降低了对位移精度的要求。

实验装置如图 3 所示,将相机通过机械过渡件安装在高精度二维平移台上,平移台固定在光学平台上,由(1)式计算错位半个像元成像需要的距离,按照图 1 的移位方式移动相机,每移位一次,就成像一次,得到 4 幅相互错位半个像元的低分辨率图像。由于多次成像为不同时刻,实验过程中,相机曝光时间、增益等参数保持不变,为保持光照条件一致,采用溴钨灯通过积分球照亮靶标,并保持给溴钨灯供电的直流电源输出功率稳定不变,即多次移位成像时,积分球出口处辐射亮度保持稳定,相机各项参数相同。

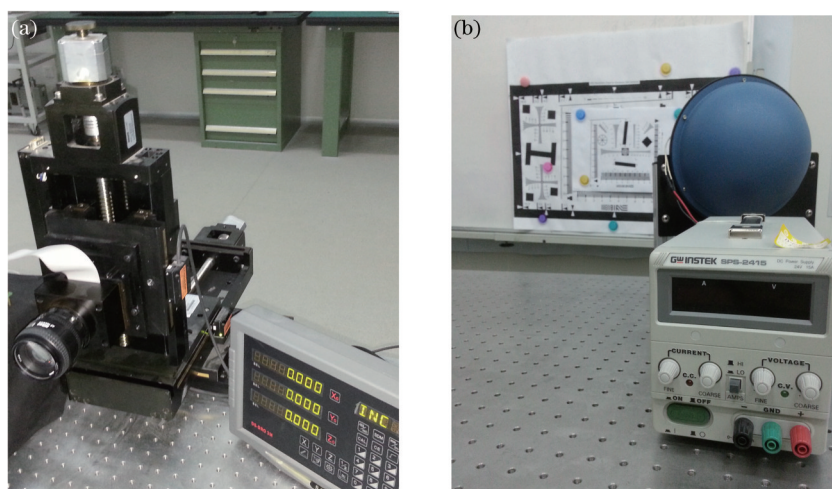


图 3 实验装置。(a)相机和平移台;(b)靶标和照明

Fig.3 Experimental equipment. (a) Camera and translation table; (b) target and illumination

### 3 错位成像图像重建与复原

对得到的多幅相互错位半个像元的低分辨率图像,按照相互移位关系,进行插值、融合,得到重建高分辨率图像,并采用图像复原进行MTF补偿(MTFC),得到最终高分辨率图像,错位成像图像处理过程如图4所示。

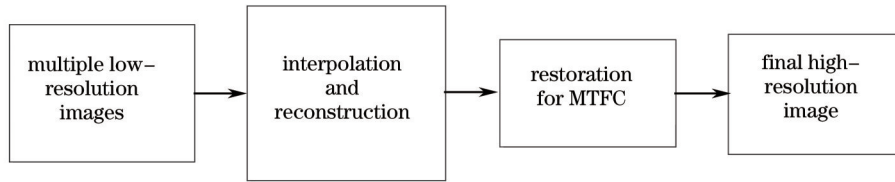


图4 图像重建和复原

Fig.4 Image reconstruction and restoration

#### 3.1 插值和重建

##### 1) 对角错位重建

采用对角错位成像,如图1(a)所示,得到2幅低分辨率图像为  $f_{loc1}(i,j)$ 、 $f_{loc2}(i,j)$  其中  $i=1,2,\dots,m$ ,  $j=1,2,\dots,n$ ,即像素数量为  $m \times n$ 。由对角错位相互移位关系,可得对角错位重建高分辨率图像  $g_{dg}(i,j)$ ,其像素数量为  $2m \times 2n$ 。

$$\begin{cases} g_{dg}(2i-1, 2j-1) = f_{loc1}(i,j) \\ g_{dg}(2i, 2j) = f_{loc2}(i,j) \end{cases}, \quad (2)$$

$g_{dg}(2i-1, 2j)$  和  $g_{dg}(2i, 2j-1)$  需要根据邻域真实采样点进行插值获得,本文采用三次B样条插值。

##### 2) 四点错位重建

采用四点错位成像,如图1(b)所示,得到4幅低分辨率图像为  $f_{loc1}(i,j)$ 、 $f_{loc2}(i,j)$ 、 $f_{loc3}(i,j)$ 、 $f_{loc4}(i,j)$ ,  $i=1,2,\dots,m$ ,  $j=1,2,\dots,n$ 。由四点错位相互移位关系,可得四点错位重建高分辨率图像  $g_{fp}(i,j)$ ,其像素数量为  $2m \times 2n$ 。

$$\begin{cases} g_{fp}(2i-1, 2j-1) = f_{loc1}(i,j) \\ g_{fp}(2i-1, 2j) = f_{loc2}(i,j) \\ g_{fp}(2i, 2j) = f_{loc3}(i,j) \\ g_{fp}(2i, 2j-1) = f_{loc4}(i,j) \end{cases}, \quad (3)$$

四点错位成像的重建过程,不需要插值,对4幅低分辨率图像交错重组即可。

#### 3.2 图像复原

图像复原是利用图像退化的某种先验知识来复原退化图像<sup>[15]</sup>。如图5左半部分所示,光电成像系统图像退化过程可以描述为输入图像与光电成像系统点扩展函数(PSF)的卷积和加性噪声的引入过程。

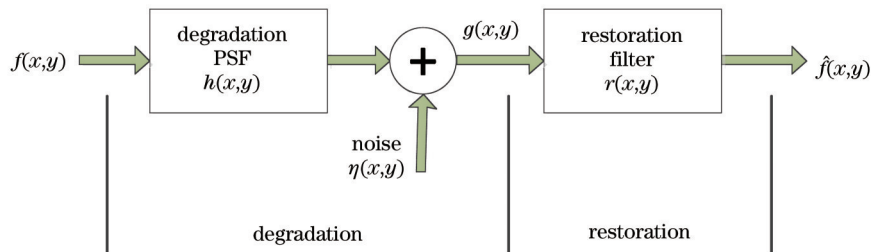


图5 图像退化和复原

Fig.5 Image degradation and restoration

原始图像为  $f(x,y)$ ,退化函数PSF为  $h(x,y)$ ,加性噪声为  $\eta(x,y)$ ,则输出退化图像  $g(x,y)$  为

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) + \eta(x,y), \quad (4)$$

式中“\*”表示空间卷积。频域中可以表示为

$$G(u,v) = F(x,y)H(u,v) + N(u,v), \quad (5)$$

式中  $G(u,v), F(u,v), H(u,v), N(u,v)$  分别为  $g(x,y), f(x,y), h(x,y), \eta(x,y)$  的傅里叶变换。

图像复原是图像退化的逆过程,如图5右半部分所示,通过构造复原滤波器  $r(x,y)$ ,来获得原始图像的一个估计  $\hat{f}(x,y)$ ,其傅里叶变换分别为  $R(u,v)$ 、 $\hat{F}(u,v)$ 。维纳滤波是经典的图像复原方法之一<sup>[15]</sup>,维纳滤波器在频域的表达式为

$$R(u,v) = \frac{H^*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + K}, \quad (6)$$

式中  $H(u,v)$  是待复原图像 PSF 的傅里叶变换,  $H^*(u,v)$  是  $H(u,v)$  的复共轭,  $K$  为规整化因子,通常取待复原图像信噪比(SNR)的倒数。

由(6)式可知,构造维纳复原滤波器需要预先估计待复原图像的 PSF 和 SNR,本文采用 Choi<sup>[16]</sup>介绍的刃边法估算 PSF,并采用其中信噪比定义估算 SNR。构造好复原滤波器后,可以在频域进行图像复原,

$$\hat{F}(u,v) = R(u,v)G(u,v), \quad (7)$$

对  $\hat{F}(u,v)$  作傅里叶反变换,即可得到估计图像  $\hat{f}(x,y)$  空间域表示。

## 4 实验与结果分析

如图3所示,使用三维平移台,实验中仅用到其中二维,其位移由光栅尺测量并通过数显表显示,移位精度达  $1 \mu\text{m}$ 。采用自行设计的 KAI-1020 相机,像元尺寸为  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ ,有效像元为  $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ ,光学镜头采用尼康 AF 50 mm f/1.4D 标准镜头,焦距为 50 mm,通过机械设计安装在平移台上。图6(a)是 ISO12233 子图像,将其打印出来用作本实验的靶标,图6(a)中绿色方框为第5组竖直黑白条纹,其条纹宽度为  $502 \mu\text{m}$ ,由(1)式可计算出 KAI-1020 相机恰好分辨到第5组竖直黑白条纹的物距为 3392 mm,调整相机和靶标位置,满足物距要求,使 KAI-1020 的  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$  CCD 像元对应靶标上  $502 \mu\text{m} \times 502 \mu\text{m}$  区域成像,恰好分辨到第5组竖直黑白条纹。

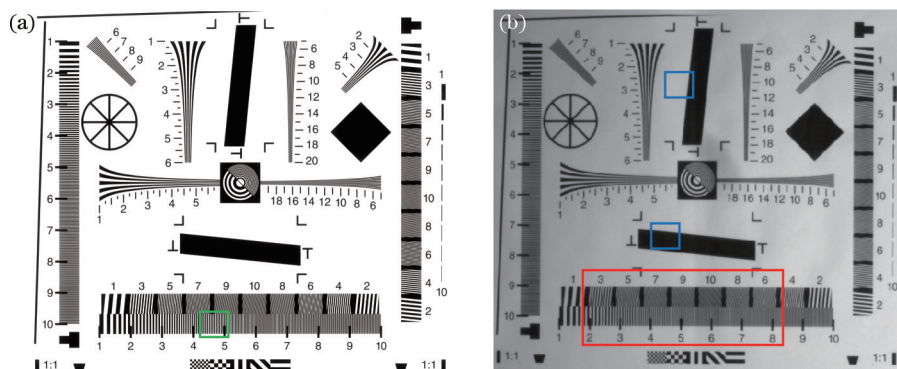


图6 (a)原始ISO12233子图像;(b)其中一幅低分辨率图像  $f_{loc1}$

Fig.6 (a) Original ISO12233 sub-image; (b) one of low-resolution images  $f_{loc1}$

实验中, KAI-1020 曝光时间为 135 ms, 镜头  $F$  数为 4。溴钨灯电源电压为 12.8 V, 电流为 4.51 A, 此时标定积分球出口处光源波长范围为 380~1080 nm, 平均辐射亮度为  $250.5 \text{ W}/(\text{Sr} \cdot \text{m}^2)$ 。调好物距后,为了找出像元与第5组条纹对齐的位置,以  $1/10$  像元(即  $50 \mu\text{m}$ )为步长,沿水平方向移动相机,分别成像,找出对齐的位置,并以此位置为错位成像的起始位置,成像得到第一幅低分辨率图像  $f_{loc1}$ 。错位半个像元需要移动  $251 \mu\text{m}$ ,按照四点错位成像方式移动相机,分别得到  $f_{loc1}, f_{loc2}, f_{loc3}, f_{loc4}$  共 4 幅低分辨率图像,像素数量为  $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 。图6(b)为其中一幅低分辨率图像  $f_{loc1}$ 。

按照上述图像重建方法,使用  $f_{loc1}$  和  $f_{loc3}$  可得到对角错位成像结果  $g_{dg}$ ,使用  $f_{loc1}, f_{loc2}, f_{loc3}$  和  $f_{loc4}$  可得到四点错位成像结果  $g_{\square}$ ,重建结果图像像素数量均为  $2000 \text{ pixel} \times 2000 \text{ pixel}$ 。为方便对比,图7给出图6(b)红色方框内的细节部分。图7(a)为原始ISO12233子图像,图7(b)为普通成像图像,为方便与错位成像结果图像相比较,

采用双三次插值放大2倍,记为 $f_{loc1.2x}$ 。图7(c)是对角错位成像的结果 $g_{dg}$ ,图7(d)是四点错位成像的结果 $g_{fp}$ 。如图6(b)蓝色方框标注,ISO12233靶标中包含水平和垂直刃边图像,可以采用刃边法估算PSF,使用3.2节的图像复原方法,对图7(b)~(d)进行图像复原,复原结果分别图7(e)~(g),分别记为 $f_{loc1.2x\_MTFC}$ 、 $g_{dg\_MTFC}$ 、 $g_{fp\_MTFC}$ 。对于普通的、无理想刃边的图像,有两种常用方案获取其PSF:1)寻找图像中类似于刃边的子图像,如屋顶边缘,采用刃边法估算PSF;2)在实验室对含理想刃边的靶标成像,提前测量在相同相机工作参数条件下的PSF,相机工作参数相同时,其PSF基本不变,可以用来对相同相机参数情况下拍摄的普通的、无刃口图像进行图像复原。

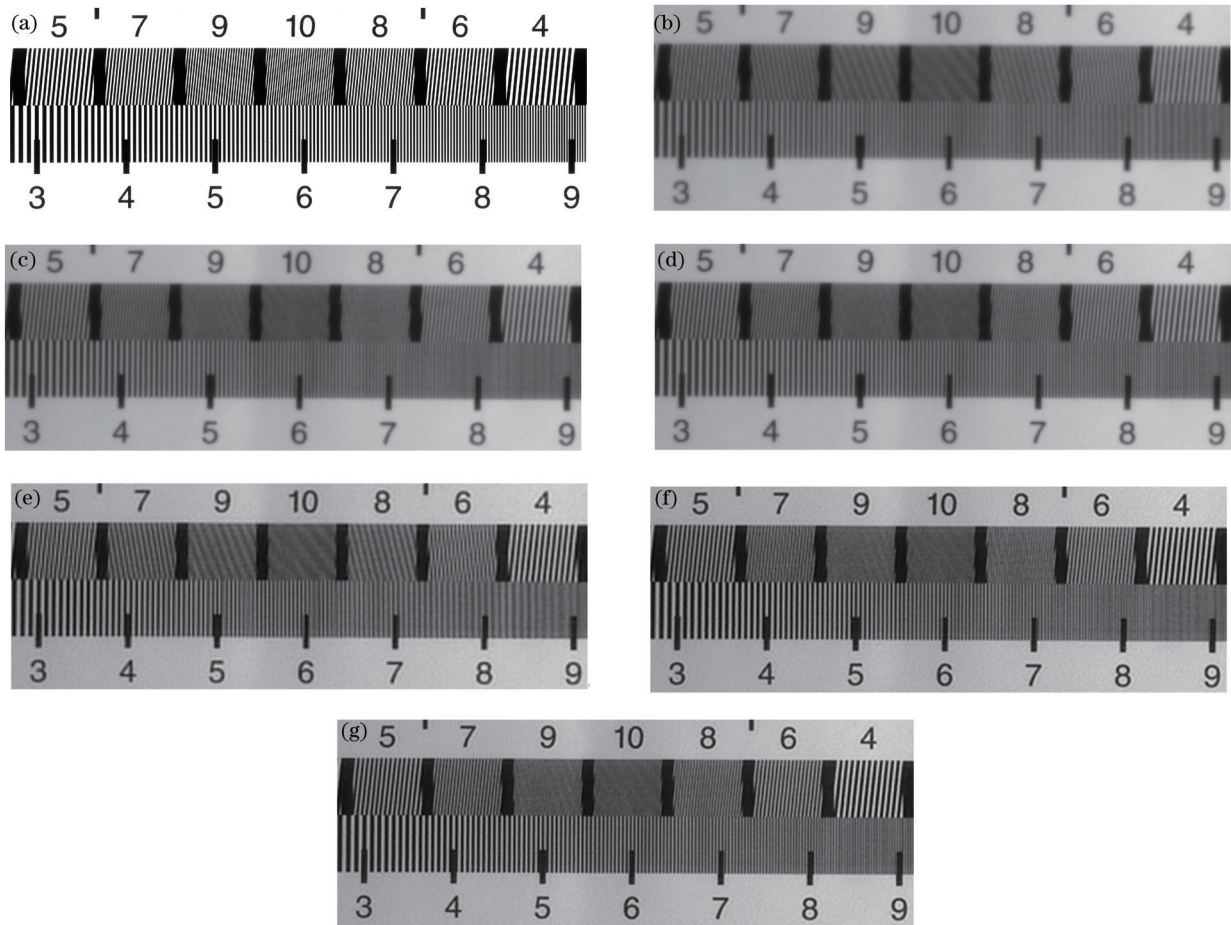


图7 (a)原始靶标;(b) $f_{loc1.2x}$ ;(c)  $g_{dg}$ ;(d)  $g_{fp}$ ;(e) $f_{loc1.2x\_MTFC}$ ;(f)  $g_{dg\_MTFC}$ ;(g)  $g_{fp\_MTFC}$

Fig.7 (a) Original target; (b)  $f_{loc1.2x}$ ; (c)  $g_{dg}$ ; (d)  $g_{fp}$ ; (e)  $f_{loc1.2x\_MTFC}$ ; (f)  $g_{dg\_MTFC}$ ; (g)  $g_{fp\_MTFC}$

由图7可知,普通成像模式下,图7(b)只能分辨到第5组竖直黑白条纹,即对应CCD相机的奈奎斯特频率。采用错位成像模式,图7(c)、(d)则可以分辨到第7组竖直黑白条纹,即图像目视视觉分辨力提高了1.4倍。图7(b)上半部分第5组倾斜黑白条纹开始出现叠栅条纹,由于图像混叠,第7组倾斜黑白条纹开始出现伪分辨,倾斜方向相反。而图7(c)、(d)错位成像的结果,第5组倾斜黑白条纹没有叠栅条纹,第7组倾斜黑白条纹的倾斜方向以及个数也能正确分辨,到第10组倾斜条纹才开始出现明显的叠栅条纹,采用错位成像技术降低了图像混叠。

采用刃边法分别估算图像 $f_{loc1.2x}$ 、 $g_{dg}$ 和 $g_{fp}$ 的MTF。图8给出了其水平方向MTF曲线对比,可见,错位成像结果的MTF均优于直接插值的普通成像的MTF。

图7(e)是对图7(b)图像复原的结果,图7(e)中第6组竖直黑白条纹仍然不能分辨,第5组倾斜黑白条纹仍然存在叠栅条纹,可见MTFC并没有提高分辨力。图9给出了对角错位、四点错位成像图像在采用MTFC前

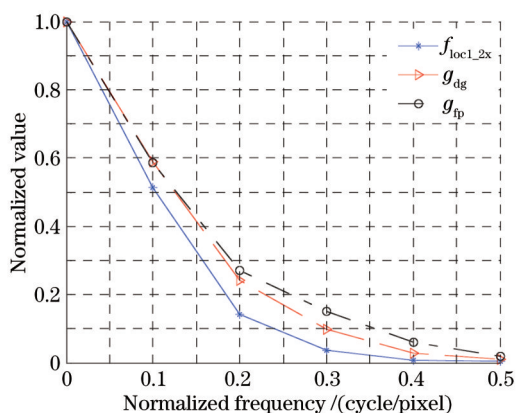


图 8 三种成像模式水平方向 MTF 对比

Fig.8 Comparison of horizontal MTF at three imaging modes

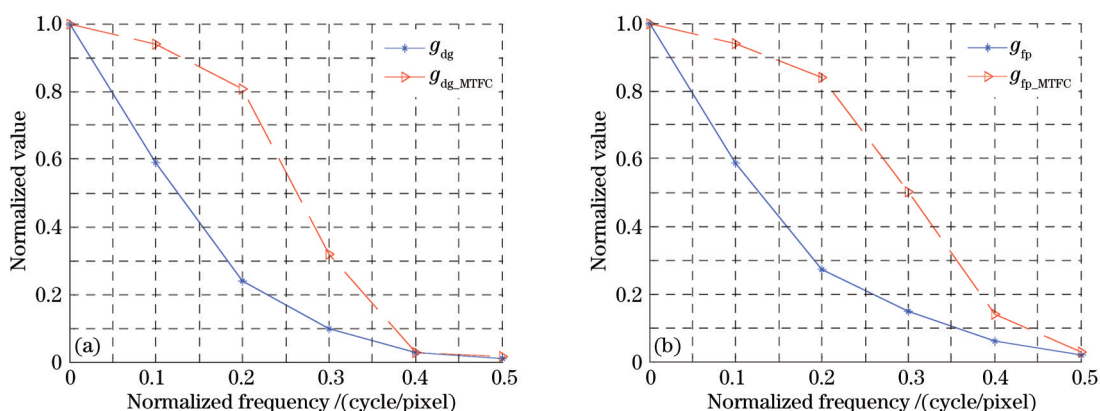


图 9 (a)  $g_{dg}$  和  $g_{dg\_MTFC}$  的 MTF; (b)  $g_{fp}$  和  $g_{fp\_MTFC}$  的 MTF

Fig.9 (a) MTF of  $g_{dg}$  and  $g_{dg\_MTFC}$ ; (b) MTF of  $g_{fp}$  and  $g_{fp\_MTFC}$

后的 MTF 曲线对比。图 9 表明, MTFC 虽然没有提高分辨率, 但提高了 MTF, 且中频提高比较明显。

调制传递函数面积(MTFA)可以更全面地衡量图像质量<sup>[2]</sup>, 分别计算各图像在空间频率(0,0.5)内 MTFA, 结果如表 1 所示。灰度平均梯度<sup>[17]</sup>(GMG)和拉普拉斯能量<sup>[18]</sup>(EOL)是客观的无参考图像评价参数, 其值越大表示图像层次越多、图像越清晰。除分辨率外, 图像信噪比(SNR)也是很重要的评价指标, 其估算结果如表 1 所示。

表 1 客观评价参数对比

Table 1 Comparison of objective evaluation parameters

	$f_{loc1}$	$f_{loc1\_2x}$	$g_{dg}$	$g_{fp}$	$f_{loc1\_2x\_MTFC}$	$g_{dg\_MTFC}$	$g_{fp\_MTFC}$
GMG	23.6323	10.0007	13.8231	16.3104	19.8061	26.0553	31.6949
EOL	0.2589	0.0624	0.1071	0.1606	0.1547	0.2465	0.3579
MTF at 0.5	0.0978	0.0044	0.0101	0.0181	0.0080	0.0151	0.0294
MTFA in (0,0.5)	0.2462	0.1199	0.1459	0.1577	0.2086	0.2601	0.2937
SNR	104.1120	66.8563	62.6619	56.2002	52.0289	48.4382	42.0050

由表 1 中的评价参数对比可知, 从 GMG、EOL 计算结果看, 错位成像的图像质量优于普通成像放大 2 倍的图像质量, 且四点错位比对角错位图像质量更好, 图像复原后 GMG 和 EOL 增大。MTF 和 MTFA 结果表明, 相比于低分辨率图像  $f_{loc1}$ , 错位成像图像的 MTF 降低, 但经过图像复原后, 能在一定程度上提高 MTF。必须注意的是, SNR 计算结果表明, 错位成像图像的 SNR 降低, 采用图像复原后, SNR 进一步降低, 事实上, 图像复原本质是图像锐化, 增强边缘细节的同时必然也会增强噪声, 提高 MTF 势必造成 SNR 降低, 图像复原时, 必须合理构造复原滤波器, 在 MTF 和 SNR 之间折衷。

## 5 结 论

提出了一种基于高精度二维平移台实现 CCD 错位成像的方法,并利用二维平移台对 KAI-1020 相机整体二维移位,对 3392 mm 远处的 ISO12233 靶标成像,得到了多幅相互错位半个像元的低分辨率图像。按照对角错位、四点错位模式高分辨率图像重建方法,对得到的相互错位半个像元的多幅图像进行重建,并采用图像复原技术对错位成像重建得到的高分辨率图像进行 MTF 补偿。结果表明,错位成像技术,能将图像目视视觉分辨力提高到 1.4 倍,降低图像混叠,增强图像质量,GMG、EOL 以及 MTF 客观评价参数也表明,错位成像技术能提高图像质量,且四点错位优于对角错位。图像复原有效地补偿了错位成像重建高分辨率图像的 MTF,解决了重建图像分辨力提高、MTF 下降的问题,但图像复原同时会降低图像 SNR,在实际复原中,应合理构造复原滤波器,在 MTF 和 SNR 之间折衷。提出的错位成像实现方法,大大降低了对移位精度的要求,且易于实现,如果改善实验条件或者改进算法,可进一步提高图像质量。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Shengchun, Huang Yaping, Luo Siwei, *et al.*. Design of high-resolution imaging system based on doglegged sampling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0911003.  
王胜春,黄雅平,罗四维,等.基于折线采样的高分辨率成像系统设计[J].*光学学报*,2012,32(9):0911003.
- 2 Li Yapeng, He Bin. Quantitative evaluation of image quality of CCD subpixel imaging using MTF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 443-448.  
李亚鹏,何斌.采用 MTF 定量评估 CCD 错位成像的成像质量[J].*红外与激光工程*,2013,42(2):443-448.
- 3 O Haggolle, J M Martinuzzi, C Latory. How to double the spatial resolution of a push-broom instrument [J]. *IEEE*, 1994, 3: 1553-1555.
- 4 C Latory, B Rouge. In-flight commissioning of SPOT5 THR quincunx sampling mode [C]. *SPIE*, 2003, 4881: 189-199.
- 5 W Skrbe, E Lorenz. HSRS: An infrared sensor for hot spot detection [C]. *SPIE*, 1998, 3437: 167-175.
- 6 Zhou Feng, Wang Shitao, Wang Huaiyi. Study of several points about subpixel imaging technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, 23(4): 26-33.  
周峰,王世涛,王怀义.关于亚像元成像技术几个问题的探讨[J].*航天返回与遥感*,2002,23(4):26-33.
- 7 F P Blommel, P N J Dennis, D J Bradley. Effects of microscan operation on staring infrared sensor imagery [C]. *SPIE*, 1991, 1540: 653-679.
- 8 H S Kim, K Y Wee, Y C Park, *et al.*. Compact MWIR camera with x20 zoom optics [C]. *SPIE*, 2001, 4369: 673-679.
- 9 J Fortin, P C Chevrette. Realization of a fast microscanning device for infrared focal plane arrays [C]. *SPIE*, 1996, 2743: 185-196.
- 10 J L Miller, J M Wiltse. Benefits of microscan for staring infrared imagers [C]. *SPIE*, 2004, 5407: 127-138.
- 11 Jin Weiqi, Liu Bin, Wang Xia, *et al.*. High-precision controllable microscanning device based on piezoelectric ceramics and sliding guide rail: CN, 102384787[P]. 2012-12-12.  
金伟其,刘斌,王霞,等.一种基于压电陶瓷和滑动导轨的高精度可控微扫描装置:中国,102384787[P].2012-12-12.
- 12 Wu Xinshe, Cai Yi. Techniques of optical microscan in staring infrared imaging system [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2007, 26(1): 10-14.  
吴新社,蔡毅.红外凝视成像系统中的光学微扫描技术[J].*红外与毫米波学报*,2007,26(1):10-14.
- 13 Zhuo Ning, Sun Huayan, Zhang Haijiang. A new approach for improvement of CCD imaging resolution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 777-780.  
卓宁,孙华燕,张海江.一种新的提高 CCD 成像分辨率的方法[J].*光学学报*,2005,25(6):777-780.
- 14 Xu Zhengping, Zhai Linpei, Ge Wenqi, *et al.*. CCD geometric superresolution method based on subpixel [J]. *Optics Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2447-2453.  
徐正平,翟林培,葛文奇,等.亚像元的 CCD 几何超分辨率方法[J].*光学精密工程*,2008,16(12):2447-2453.
- 15 Zou Mouyan. *Deconvolution and Signal Recovery* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.  
邹谋炎.反卷积与信号复原[M].北京:国防工业出版社,2001.
- 16 T Choi. IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement using Edge and Pulse Method [D]. Brookings: South Dakota State University, 2002.



- 17 Li Yongle, Wang Wei, Lou Jingtao, *et al.*. Defocus deblurring for catadioptric omnidirectional imaging based on coded aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511004.  
李永乐, 王 炜, 娄静涛, 等. 基于编码孔径的折反射全向成像去散焦模糊技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0511004.
- 18 Guo Lingling, Wu Zepeng, Zhang Ligu, *et al.*. Multichannel blind deconvolution-based on-orbit estimation of point spread function for space optical remote sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0428001.  
郭玲玲, 吴泽鹏, 张立国, 等. 基于多通道盲反卷积的空间光学遥感器在轨点扩散函数估算[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0428001.

栏目编辑: 苏 岑