

编者按:这篇文章是在学术上争议比较大的文章,很多专家对该文进行了同行评议。有些专家认为该文有较大的创新,并且异形像元技术已经申请了发明专利,值得发表。有些专家认为该文学术水平一般,无重大理论和实验意义,建议退稿。鉴于此种情况,本刊编辑部认为学术争议比较大的文章往往一定程度上代表某种学术前沿领域,所以特设一个争鸣专栏,发表此文。希望该文能引起本领域读者的兴趣,参与文章的学术讨论,以期推动相关学术领域的发展。

文章编号 1004-924X(2009)10-2620-07

利用异形像元探测器提高空间分辨率

刘妍妍^{1,2}, 张新¹, 徐正平^{2,3}, 张建萍¹, 王灵杰¹, 王德江³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术
中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;
3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了解决光电系统成像中探测器分辨率低的问题,针对造成探测器分辨率低的两大主要因素—采样率不足及感光区域的低通滤波效应,提出一种基于异形像元探测器的超分辨成像方法。综合现有的超分辨重建技术和减少像元尺寸方法的优缺点,将现有的探测器矩形像元逐一“变形”,去除同一位置 1/4 象限;利用该异形像元探测器阵列获取一序列相互错位 1/2 像元的欠采样图像;最后利用图像算法计算出这些图像的灰度矩阵信息,重建最终的高分辨率图像。该方法可同时提高探测器的采样频率和截止频率,拓展带宽,从而实现高分辨率成像。为了验证该方法的有效性,在试验中选取填充因子 100% 的 $46\ \mu\text{m} \times 46\ \mu\text{m}$ 中波红外探测器,利用焦距为 6 000 mm、口径为 600 mm 的红外平行光管和焦距为 50 mm 的中波红外镜头成像,如果不采用任何技术,物方分辨率为 11.04 mm;过采样技术可将分辨率提高 1.60 倍,物方分辨率为 6.9 mm;而采用异形像元探测器超分辨成像方法,在试验中将每个像元都抠掉 $23\ \mu\text{m} \times 23\ \mu\text{m}$ 后,物方分辨率为 3.1 mm。

关键词:超分辨成像;异形像元探测器;像元细分

中图分类号: TN215; TP391 **文献标识码:** A

Enhancing spatial-resolution with detectors of special-shaped pixels

LIU Yan-yan^{1,2}, ZHANG Xin¹, XU Zheng-ping^{2,3},
ZHANG Jian-ping¹, WANG Ling-jie¹, WANG De-jiang³

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, 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*; 3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: For the overwhelming majority of E-O imaging systems, spatial resolution is strictly limited by the

收稿日期:2009-06-30;修订日期:2009-08-07.

基金项目:中国科学院知识创新工程资助项目(No. O69Y32J060)

detector. This paper studies the main reasons for the influence of the detector on resolution and proposes an imaging method based on special-shaped detectors to enhance the resolution. It is implemented by two detector-arrays of special-shaped pixel where each pixel is reduced by 25% in size. The multiple mis-registered frames are used to solve the grayscale matrix and reconstruct the super-resolution image in the post-detection processing. It presents a theoretical assessment that if a small part of the active area of each pixel is deducted, the frequency-response distribution of the complement will be equal to that of the deducted part independent of the amplitude. To demonstrate the arrangement, a MWIR experiment is undertaken, then two $46\ \mu\text{m} \times 46\ \mu\text{m}$ linear arrays with a 100% full factor are chosen initially and a quarter each pixel is removed. The result demonstrates that the bar-contrast interval is discriminated in an objective space by up to 3.1 mm using an optical system composed of a 6 000 mm $f/10$ collimator and a 50 mm IR lens. By contrast, it is equivalent to an 11.04 mm with conventional imaging method and 6.9 mm through oversampling technology. The study verifies that the most visually pleasing image or some specific information can be captured by system-matching from optics to electronics for better processing, and including some pre-detection and post-detection processing.

Key words: super-resolution imaging; detector of special-shaped pixel; pixel subdivision

1 引言

在光电探测、成像系统中实现超高分辨率一直是光电成像领域中重要的研究探索方向,尤其在航天、遥感、目标识别等领域。

早在 20 世纪 60 年代 Harris^[1] & Goodman^[2] 提出将超越经典衍射极限的分辨率叫做超分辨率或带宽外推。而随着光学成像向光电成像的全面转变,系统的分辨率将不仅仅受限于光学系统的衍射极限,还要受探测器不足采样频率而引发折叠混淆效应的影响,使得可真实重建的最高频率为 Nyquist 频率(采样频率一半)。为消减欠采样引起的折叠混淆效应, Tsai & Huang 于 1984 年最先提出从一序列欠采样图像中融合、重建一幅高分辨率图像的思想,后来将这种方法称为超分辨重建^[3-4]。超分辨重建技术是一种图像融合技术,其基本思想在于根据需把相关性和互补性很强的多幅图像的有用信息综合在一起,以弥补原始单源观测图像承载信息的局限性^[5]。

为了更加有效地实现超分辨重建,各个国家的研究人员一直处于不断地探索与试验当中。从最初的微扫描技术到广泛用于传输型航天遥感相机的亚像元技术,还有 FUJI 公司的六角蜂窝型探测器——超级 CCD 等等^[6-14]。

但是 Joseph N. Mait 等人于 2003 年就提出有效提高整个光电成像系统的空间分辨率,不能仅仅依赖于电子学,也不能将各个子系统分割开

进行设计、优化^[15]。就探测器某固定感光区尺寸而言,超分辨重建技术使 Nyquist 频率 f_N 不再小于像元感光区点扩散函数决定的截止频率 f_{det} 后,系统的空间分辨率将不再受 Nyquist 频率 f_N 限制,而取决于探测器的截止频率 f_{det} 和光学系统的衍射截止频率之间的匹配程度,那么再用更复杂的处理方法来获取更高的采样频率已经没有太多的实际意义。而针对该问题,最直接的解决方案是减少探测器的像元尺寸。在保证光学系统的通光孔径和调制传递函数的前提下,像元尺寸越小,分辨率将越高。采用小像元尺寸的探测器芯片,可以充分的挖掘光学系统的潜力,但其缺点是受到相机光学相对孔径、焦面辐射照度和探测器工艺制造方法的限制,像元尺寸减少有一个极限值,不可能无限的减少,并且随着探测器像元尺寸减少,散粒噪声也将会增大,灵敏度降低,另外像元间还会产生串音现象。所以为了平衡探测器的整体成像性能,光电系统尤其是红外系统,对探测器的感光面积有一定要求,不可以任意减少。

有鉴于此,本文提出一种利用异形像元探测器的超分辨成像方法。该方法可以同时提高探测器的采样频率和像元截止频率,并有效提高探测器的空间分辨率,使之与光学系统更好的匹配。

2 理论分析

分辨率反映了系统分辨物体细节或者能分辨开两个靠近的点的的能力,是一个很重要的指标参

数。对于光电成像系统来说,系统空间分辨率将受到光学系统和探测器的双重限制。瑞利指出:经过光学系统能分辨的两个等亮度点间的距离对应艾利斑的半径,即一个亮点的衍射图案中心与另一个亮点的衍射图案的第一暗环重合时,这两个亮点则能被分辨。这时在两个衍射图案光强分布的叠加曲线中有两个极大值和一个极小值;而由于探测器为离散器件,根据采样定理,可有效重建的两个等亮度点的最小距离为两倍像元中心距。另外,单个点光源本身经成像系统(包括光学系统和探测器像元感光区)后得到弥散斑的尺寸也会影响系统的空间分辨率。如果将其转化为频域讨论时,空间分辨率为频域中有效空间频率 f_{sys} 的倒数。在成像过程中影响空间分辨率的因素主要有三个,分别是:(1)光学系统的光瞳引起脉冲响应宽度对高频信息的限制,截止频率为 f_{opt} ; (2)像元感光区引起脉冲响应对高频信息的进一步限制,截止频率为 f_{det} ; (3)采样系统所特有的离散采样特性,可真实重建的最高频率为采样频率的一半 f_N 。 f_{sys} 取决于 f_{opt} 、 f_{det} 和 f_N 三个空间频率的最小值^[16],如式(1)所示,其中 λ 为波长, f' 为光学系统的焦距, D 为光瞳直径; P 为探测器中像元感光区的尺寸; d 为采样间距。

$$f_{\text{sys}} = \min \left\{ f_{\text{opt}} = \frac{1}{1.22\lambda f'/D}, f_{\text{det}} = \frac{1}{P}, f_N = \frac{1}{2d} \right\}, \quad (1)$$

除了波长较长的系统外,大多数系统的 f_N 最小,其次为 f_{det} , f_{opt} 值最高。超分辨重建技术就是用来有效地提高 f_N ,但是当感光区尺寸不变时,如果超分辨重建技术使 Nyquist 频率不再小于探测器的截止频率,系统的空间分辨率将不再受 Nyquist 频率限制 f_{det} 时,系统的空间分辨率就要受限于 f_{det} 。

3 异形像元探测器成像

根据傅里叶变换的相似性定理,为了增加函数的频域带宽,就要压缩空域中的坐标^[17]。

为了进一步提高探测器的分辨率并同时有效权衡其他性能,我们提出一种折中的方法——利用异形像元探测器成像。设想将阵列中的每个像元都去除其中部分感光区,利用空域坐标压缩来提高频域带宽。在这里,我们去除像元面积的

1/4,如图 1。那么就单个方向而言,像元感光区的空域坐标减小了 1/2,其频域带宽应相应增加二倍。但剩余形状的像元将无法接收到缺角位置处的信号,那么任何信号处理系统都无法恢复这些信息。为了配合该想法实现,我们将两列完全相同的线阵探测器集成到一块芯片上,只是将其中一列翻转 180°,与另一列相隔 N 个像元的距离并排放置,如图 2 所示。然后利用 TDI 扫描实现 N 次亚像元采样,将像元灰度细分四份,得到一序列灰度值,如表 1 所示。由于对于同一位置的图像,两列异形像元探测器顺序输出的灰度值是不同的,如式(2)所列,所以可最终利用一定算法解出每隔 1/4 像元处所对应的灰度值,并最终重建出高分辨图像。

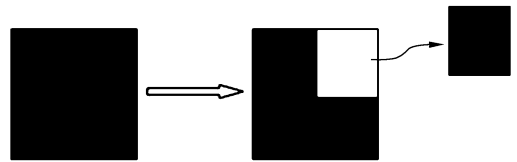


图 1 异形像元图

Fig. 1 Special-shaped pixel

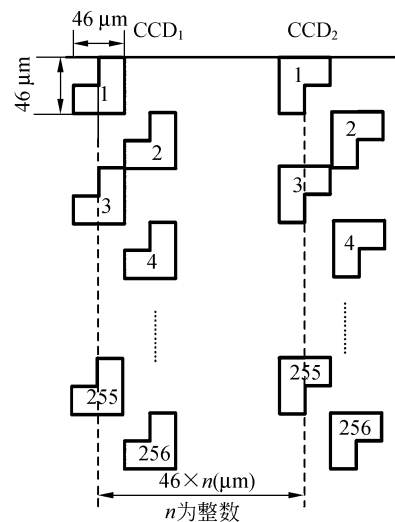


图 2 视场拼接

Fig. 2 Field butting

表 1 在扫描方向上每个像元所对应的灰度值
Tab. 1 Grayscale value at each quarter of a pixel in scanning direction

a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	...	a_{1n}
a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	...	a_{2n}

根据图 2 和表 1 对应所得到的灰度方程为:

$$\begin{aligned}
 y_{\text{left}_1} &= \frac{1}{3}(a_{12} + a_{21} + a_{22}) & y_{\text{right}_1} &= \frac{1}{3}(a_{11} + a_{12} + a_{21}) \\
 y_{\text{left}_2} &= \frac{1}{3}(a_{13} + a_{22} + a_{23}) & y_{\text{right}_2} &= \frac{1}{3}(a_{12} + a_{13} + a_{22}) \\
 y_{\text{left}_3} &= \frac{1}{3}(a_{14} + a_{23} + a_{24}) & y_{\text{right}_3} &= \frac{1}{3}(a_{13} + a_{14} + a_{23}) \\
 & \vdots & & \\
 y_{\text{left}_n} &= \frac{1}{3}(a_{1,n} + a_{2,(n-1)} + a_{2,n}) & y_{\text{right}_n} &= \frac{1}{3}(a_{1,(n-1)} + a_{1,n} + a_{2,(n-1)})
 \end{aligned}$$

利用异形像元探测器的超分辨成像方法可分辨的线对尺寸为一个像元,图 3 所示。该分辨率是过

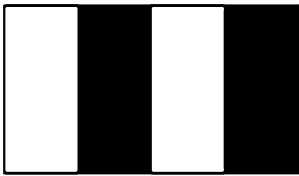


图 3 宽度为半个像元的靶标

Fig. 3 Bar contrast with half-a-pixel size

采样技术无法实现的,因为经过 n 次亚像元采样,其输出的灰度值均相等,如式(3)和式(4)所列,所以无法解出细分后的像元灰度从而不能清晰再现该靶标图像。

$$\begin{cases}
 y_1 = \frac{1}{4}(a_{11} + a_{21} + a_{12} + a_{22}) \\
 y_2 = \frac{1}{4}(a_{12} + a_{22} + a_{13} + a_{23}) \\
 y_3 = \frac{1}{4}(a_{13} + a_{23} + a_{14} + a_{24}) \\
 \vdots \\
 y_n = \frac{1}{4}(a_{1,(n-1)} + a_{2,(n-1)} + a_{1,n} + a_{2,n})
 \end{cases}, \quad (3)$$

$$y_1 = y_2 = y_3 = \dots = y_n, \quad (4)$$

4 MTF 评估

通常我们用光学传递函数 OTF 来评价连续光学设备的成像质量,其中 OTF 的模调制传递函数 MTF,用以表明各种频率的传递情况。OTF 应用的前提条件是系统满足线性空间不变^[18]。由于采样系统的这种离散特性,即连续输入而离

散输出,所以不满足空间不变性,使得我们试图将这一函数的概念由光学系统引入探测器中的想法存在一定的问题。当然,整个光电系统的传递函数就不能再简单的用几个子系统的传递函数相乘而得到。为了能解决这个问题,近二十多年来各个国家一直都有相关的人员在从事探测器的 MTF 以及基于过采样原理的超分辨技术性能评价的研究当中。无论是线阵扫描系统^[19]还是凝视面阵系统^[20],得出的结论都可以等效的看作是探测器的 MTF 是由单个像元感光区的脉冲响应与探测器采样两方面共同作用的结果。

$$MTF_{\text{det}}(f) = MTF_{\text{pixel}}(f) \times MTF_{\text{sampling}}(f), \quad (5)$$

多数探测器均为正矩形像元,采样点也为正交矩形分布,其二维 MTF 为:

$$\begin{aligned}
 MTF_{\text{rectangle}} &= \text{sinc}(P \cdot f_x) \text{sinc}(P \cdot f_y) \times \\
 &\quad \text{sinc}(d_x \cdot f_x) \text{sinc}(d_y \cdot f_y).
 \end{aligned} \quad (6)$$

其中 f 为输入信号的空间频率; P 分别为像元感光区的尺寸; d_x, d_y 为两个方向探测器的采样间距。

而异形像元探测器改变了感光区的形状以及尺寸,那么就不再适用于式(6)来评价。由于单个像元感光区内满足线性空间不变性,所以我们可以利用线性叠加原理以及连续傅里叶变换推导单个异形像元感光区的 MTF。假设单个像元的坐标图如图 4 所示,其扣掉部分的中心为 $(P/4, P/4)$,通过计算单个异形像元的点扩散函数的傅里叶变换来求得单个像元的 MTF,即式(7)。

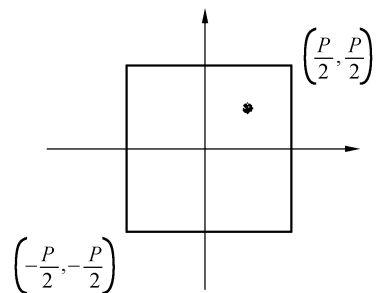


图 4 像元坐标图

Fig. 4 Coordinate of one pixel

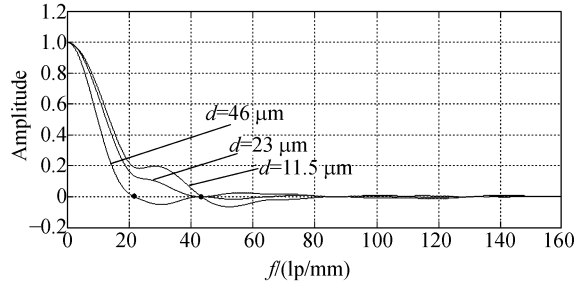
$$MTF_{\text{pixel}} = \left| F^{-1} \left\{ \frac{1}{3/4 \times P^2} \cdot \left[\text{rect} \left(\frac{x}{P}, \frac{y}{P} \right) - \text{rect} \left(\frac{x-P/4}{P/2}, \frac{y-P/4}{P/2} \right) \right] \right\} \right| = \left| \text{sinc} \left(\frac{P}{2} f_x \right) \text{sinc} \left(\frac{P}{2} f_y \right) \times \sqrt{\frac{1+8\cos \left[\frac{\pi}{2} P(f_x - f_y) \right] \cos \left(\frac{\pi}{2} P f_x \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} P f_y \right)}{9}} \right|, \quad (7)$$

由于推扫步长控制为半个像元的整数倍,所以最终的采样图样仍为正交对齐式,即不改变

$MTF_{\text{sampling}}(f)$ 。那么异形像元探测器的 MTF 为

$$MTF_{\text{det}} = \left| \frac{\text{sinc}(d f_x) \text{sinc}(d f_y) \text{sinc} \left(\frac{P}{2} f_x \right) \text{sinc} \left(\frac{P}{2} f_y \right) \times \sqrt{1+8\cos \left[\frac{\pi}{2} P(f_x - f_y) \right] \cos \left(\frac{\pi}{2} P f_x \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} P f_y \right)}}{9} \right|. \quad (8)$$

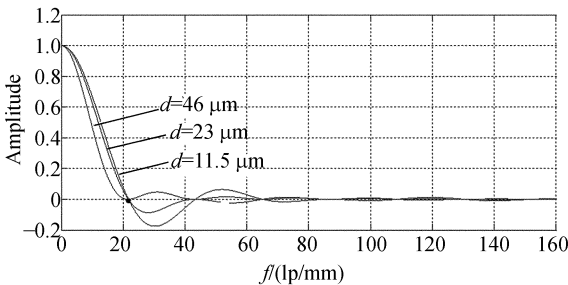
为了更加形象的显示该方法的成像性能,我们利用相同探测器,分别采用亚像元技术和该利用异形像元探测器超分辨成像方法,做数学仿真,并进行性能比较。在这里,我们仅考虑扫描方向的分辨率和 MTF。假设探测器原始尺寸为:像元为 $46 \mu\text{m} \times 46 \mu\text{m}$, 并且全部用来感光。首先利用亚像元技术令其采样间距分别为 $46 \mu\text{m}$ 、 $23 \mu\text{m}$ 、 $11.5 \mu\text{m}$, 利用式(6)做出三条 MTF 曲线,如图 5 (a); 然后如图 1 示意,将各个像元去除 $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$, 其采样间距也分别控制为 $46 \mu\text{m}$ 、 $23 \mu\text{m}$ 、 $11.5 \mu\text{m}$, 利用式(8)做出三条 MTF 曲线,如图 5 (b)。图 5 (a)和(b)自左到右相对应曲线的采样间距均相同。图 5(a)利用亚像元技术,当采样间距减少至 $23 \mu\text{m}$, f_N 等于 f_{det} , 探测器的最高有效空间频率 f_{sys} 为 21.739 lp/mm , 此后无论采样间距如何减少, f_{sys} 将不再提高, MTF 曲线提高的幅度也很小; 而相对应的(b)图中,当采样间距减少至 $23 \mu\text{m}$ 之后, f_{det} 为 43.478 lp/mm , f_{max} 仍受限于 f_N , 为 21.739 lp/mm , 但是高频处的 MTF 有大幅的提升, 随着采样间距减少至 $11.5 \mu\text{m}$ 时,



(b) 异形像元探测器成像的 MTF 曲线图
(b) MTF graphs imaged with detectors of special-shaped pixels

图 5 两种方法在扫描方向的 MTF 比较

Fig. 5 MTF comparisons between two methods in scanning direction



(a) 亚像元技术 MTF 曲线图

(a) MTF graphs by sub-pixel technology

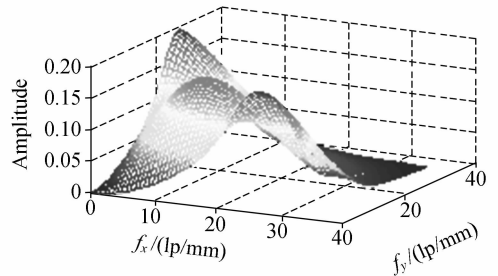


图 6 两种方法的 MTF 曲线差值

Fig. 6 MTF differences between two methods

f_{sys} 提升至 43.478 lp/mm , 高频处的 MTF 还继续升高。将式(8)和式(6)相减(图 6), 可见利用异形像元探测器可使 MTF 在全部带宽内都高于亚像元技术, 尤其是在高频处更为明显。

5 实 验

为了验证异形像元成像的有效性,我们选用两列 $46\ \mu\text{m} \times 46\ \mu\text{m}$ 的线阵探测器,将每个像元都抠掉 $1/4$ 象限 $23\ \mu\text{m} \times 23\ \mu\text{m}$ 。将两列线阵探测器集成到一块芯片,只是将其中一列翻转 180° 。

然后采用中波红外镜头对无穷远距离标准红外鉴别率板(高对比)成像,经过镜头调焦使目标聚集到红外探测器接收面上,所得鉴别率板的像经图像采集与传输系统在计算机显示屏上显示,判读图像,如果可分辨,则更换更高分辨率的红外鉴别率板,直到不能分辨为止。可分辨的最高分辨率板即代表该红外探测器可分辨的最高分辨率。

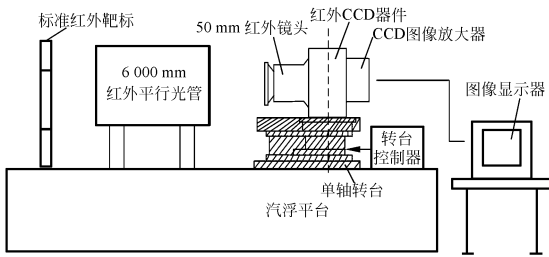


图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental setup

实验装置如图 7 所示,标准红外鉴别率板通过红外平行光管形成无穷远目标,红外 CCD 通过中波红外镜头对无穷远目标成像,单轴转台带动红外 CCD 进行推扫成像,为了避免成像过程中带来的像移,转台到转速要与探测器的行转移频率有式(9)关系,其中 d 为像元的尺寸,即 $46\ \mu\text{m}$, ν 为红外探测器的行转移频率, ω 为转台转动的角速度:

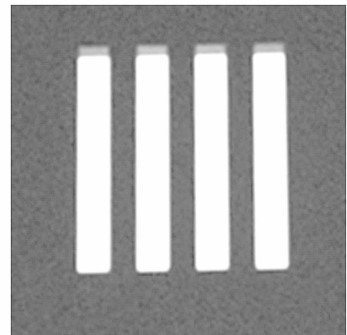
$$\omega = (d/2)\nu, \tag{9}$$

设平行光管的焦距为 f_1 ,红外鉴别率板的亮暗条纹的宽度为 α ,红外镜头焦距为 f_2 ,则 CCD 的分辨率 R 为:

$$R = \alpha \frac{f_2}{f_1}, \tag{10}$$

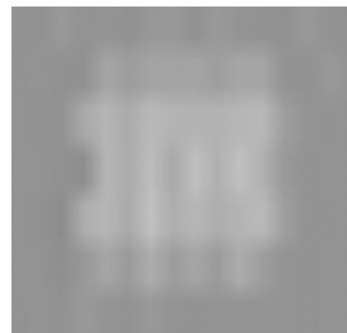
该实验中所采用的标准红外鉴别率板的温差为 $50\ ^\circ\text{C}$;红外平行光管的焦距 $6\ 000\ \text{mm}$,口径

$600\ \text{mm}$;中波红外镜头的焦距为 $50\ \text{mm}$ 。如果不采用任何技术,该探测器的可真实重建的分辨率为 $11.04\ \text{mm}$;过采样技术可将分辨率提高 1.60 倍,可分辨线对为 $6.9\ \text{mm}^{[21]}$;而利用异形像元探测器的方法,理论上其最高分辨率可达到 $2.76\ \text{mm}$ 。而在实际测试时,由于实验设备的限制,我们只有 $3.1\ \text{mm}$ 标准靶标,图 8(a)所示,而图 8(b)为经过该系统重建的最终图像。由于实验经费有限,选取了性能较低探测器芯片,并且第一次将矩形探测器像元加工成“异形”,所以加工后的结果确实出现了响应度不均等问题。该结果并不是十分理想,刚可分辨出 $4\ \text{lp}$ 的程度。但是对于 $3.1\ \text{mm}$ 靶标来说,如果利用过采样技术是无法分辨的,所以可见应用异形像元探测器成像方法的价值。我们相信随着试验条件以及加工技术的成熟,有望在今后获得较为理想的实验结果。



(a) 间隔为 3.1 mm 的靶标

(a) Targets at intervals of 3.1 mm



(b) 最终图像

(b) Ultimate image

图 8 实验结果

Fig. 8 Experimental results

6 结 论

提高光电系统成像分辨率一直都是该领域的热门难题。目前人们已经意识到只有充分实现各个子系统之间的最优匹配及兼容互补,才能获取更高的分辨率及更好的成像质量。真正限制光电成像系统分辨率的原因不仅仅是某个环节的分辨率不足,更主要的是光学和电学之间没有达到适当的特性匹配。为了更好的平衡系统间的性能匹配,本文大胆地提出一种方法:利用异形像元探测器进行成像。该方法融合光学成像、光电学和光

电信号处理等学科的相关的基础理论,在提高采样频率的同时有效地匹配光学系统和探测器两者之间的点扩散函数,从而进一步提升系统的空间分辨率。试验中选取填充因子 100% 的 $46\ \mu\text{m} \times 46\ \mu\text{m}$ 中波红外探测器,如果不采用任何技术,物方分辨率为 11.04 mm;过采样技术可将分辨率提高 1.60 倍,分辨率为 6.9 mm;而采用异形像元探测器超分辨成像方法,在试验中将每个像元都抠掉 $23\ \mu\text{m} \times 23\ \mu\text{m}$ 后,分辨率为 3.1 mm。

可以相信,随着研究的深入和加工能力的提高,该方法可获取更高的系统空间分辨率。该方法已于 2008 年申请了国家发明专利。

参考文献:

- [1] HARRIS J L. Diffraction and resolving power [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1964, 54(7):931-936.
- [2] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. 2nd ed. New York: McGraw- Hill, 1996.
- [3] TSAI R Y, HUANG T S. Multipleframe image restoration and registration[C]. *Advances in Computer Vision and Image Processing*. Greenwich, CY: JAI Press Inc., 1984:317-339.
- [4] DRIGGERS R G, KRAPELS K, YOUNG S. The Meaning of Super-Resolution [C]. *Proc. SPIE*, 2005,5784:103-105.
- [5] KOMATSUT, AIZAWA K, IGARASHI T, *et al.*. Signal-processing based method for acquiring very high resolution image with multiple cameras and its theoretical analysis [C]. *Proc. Inst. Elec. Eng.*, 1993,140(1):19-25.
- [6] FRIEDENBERG A. Microscan in infrared staring systems [J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(7): 1745-1749.
- [7] 王晓蕊,胡方明,张建奇,等. 基于微扫描的焦平面阵列成像特性研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版),2005,32(3):392-397.
WANG X R, HU F M, ZHANG J Q, *et al.*. Research on the FPA imaging character based on microscanning[J]. *Journal of Xidian University*, 2005,32(3):392-397. (in Chinese)
- [8] FANNING J D, REYNOLDS J P. Target identification performance of superresolution versus dither [C]. *Proc. SPIE*, 2008,69410N,1-12.
- [9] 金伟其,陈翼男,王霞,等. 考虑探测器填充率及微扫描对位偏差的扫描型亚像元热成像算法[J]. 红外与毫米波学报, 2008,27(4):308-312.
- [10] 杨桦,郭悦,伏瑞敏. TDICCD 的视场拼接[J]. 光学技术,2003,29(2):226-228.
YANG H, GUO Y, FU R M. Study on field butting of TDICCD[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(2):226-228. (in Chinese)
- [11] 徐之海,冯华君. 超高分辨率光电成像技术的研究进展[J]. 红外与激光工程,2006,35(4):456-463.
XU ZH H, FENG H J. Overview of research approaches for ultrahigh-resolution optoelectronic imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006,35(4):456-463. (in Chinese)
- [12] 朱家佳,文德胜,乔卫东,等. 一种 TDICCD 亚像元合成方法[J]. 光子学报, 2007,36(5):933-936.
ZHU J J, WEN D SH, QIAO W D, *et al.*. Method for composing two images of TDICCD sub-pixel camera [J]. *Acta Optica Sinia*, 2007,36(5):933-936. (in Chinese)
- [13] 张智,夏德深,孙权森. 一种亚像元遥感图像的小波插值及滤波方法[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2008,32(2):195-198.
ZHANG ZH, XIA D SH, SUN Q S. Wavelet interpolation and Filtering of subpixel remote sensing image[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2008, 32(2):195-198. (in Chinese)
- [14] <http://www.c-cnc.com/dz/news/news.asp?id=>

22091[OL].

- [15] MAIT J N, ATHALE R, GRACHT J V D. Evolutionary paths in imaging and recent trends[J]. *Optics Express*, 2003,11(18):2093-2101.
- [16] Gerald C. Holst. *Electro-Optical Imaging System Performance* [M]. 3rd ed. Bellingham Washington: SPIE Press, 2005: 83.
- [17] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [18] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2006:198.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 198. (in

Chinese)

- [19] VOLLMERHAUSEN R H, DRIGGERS R G. *Analysis of Sampled Imaging Systems* [M]. Bellingham, Washington: SPIE Process, 2000:34-36.
- [20] HADAR O, BOREMAN G D. Oversampling requirements for pixilated-imager systems[J]. *Optical Engineering*, 1999,38(5):782-785.
- [21] 车双良,汶德胜. 亚像元动态成象系统空间分辨率研究[J]. 光子学报, 2001,30(11):1418-1420.
CHE SH L, WEN D SH. The space resolution of dynamic subpixel imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11):1418-1420. (in Chinese)

作者简介:



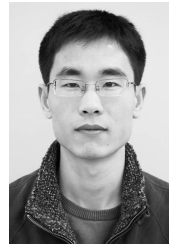
刘妍妍(1982—),女,吉林长春人,博士研究生,主要从事提高成像系统分辨率技术方面的研究。E-mail: liuyanyan_1982@126.com



徐正平(1983—),男,河南许昌人,博士研究生,2006年于东北师范大学获得学士学位,主要从事基于DSP、FPGA的伺服控制系统设计及CCD几何超分辨率成像方法的研究。E-mail: xuzo090@163.com



张建萍(1974—)女,黑龙江人,副研究员,1998年于长春理工大学获学士学位,主要从事光学系统设计的研究。E-mail:zhjp-ycy@163.com



王灵杰(1979—),男,江苏人,硕士,助理研究员,2002年于天津大学获得学士学位,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事光学系统设计研究。E-mail: wanglingjie@126.com



王德江(1981—),男,黑龙江双鸭山人,博士研究生,助理研究员,2004年于南开大学获学士学位,2007年于清华大学获硕士学位,主要从事航空相机设计技术的研究。E-mail: wangdj04@live.com

通讯作者:



张新(1968—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电成像系统设计等方面的研究。E-mail: zhanxin1968@sohu.com

(本栏目编辑:曹 金)