

## 赋形像元探测器在超分辨重建中的应用

刘妍妍<sup>1,2</sup>, 张 新<sup>1</sup>, 徐正平<sup>2,3</sup>, 张建萍<sup>1</sup>, 王灵杰<sup>1</sup>, 王德江<sup>3</sup>

( 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;  
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:** 大多数光电成像系统的空间分辨率都与探测器的元数密切相关, 增加探测器的元数是提高成像系统空间分辨率的核心问题之一。在不增加探测器元数的前提下, 提高空间分辨率的技术途径之一就是超分辨重建技术, 它通过增加探测器采样频率来提高探测器的空间分辨率。考虑到探测器的空间分辨率并不完全取决于采样作用, 且受像元孔径效应的影响, 提出了一种赋形像元探测器。基于巴比涅原理中的互补屏原则, 将原有的红外探测器中的每个正矩形像元去掉 1/4, 用剩余部分来等效获取去掉部分的高截止频率; 同时利用两列赋形像元探测器进行亚像元推扫, 结合像元细分算法, 实现超分辨重建。通过同时提高系统采样频率和探测器的截止频率来实现红外系统最终的高分辨率重建成像。

**关键词:** 赋形像元探测器; 超分辨重建; 像元细分

**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2009)06-0971-06

## Application of special-shaped-pixel detectors in super resolution reconstruction

LIU Yan-yan<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, XU Zheng-ping<sup>2,3</sup>, ZHANG Jian-ping<sup>1</sup>,  
WANG Ling-jie<sup>1</sup>, WANG De-jiang<sup>3</sup>

(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 School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** For most electro-optical imaging systems, spatial resolution is mainly related to the detector number of imaging systems. Increasing the detector number is one of the key technologies to improve the spatial resolution. However, the technology called super resolution reconstruction could improve resolution without increasing the detector number, which was realized by increasing sampling frequency. Considering that the spatial resolution of the detector didn't depend entirely on the sampling effect, but also on the pixel aperture effect, a special-shaped-pixel detector was proposed. Based on the

收稿日期: 2009-04-05; 修订日期: 2009-06-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目 (O69Y32J060)

作者简介: 刘妍妍 (1982-), 女, 吉林长春人, 博士生, 主要从事提高成像系统分辨率技术方面的研究。Email: liuyanyan\_1982@126.com

导师简介: 张新 (1968-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电成像系统设计等方面的研究。

Email: optlab@ciomp.ac.cn

complementary screens in Barbinet's principle, the original IR detectors were deducted a quarter at specific place of each rectangle pixel and the remnant was used to equal the quarter on cut-off frequency. Then two special-shaped-pixel arrays were placed parallelly to push-scan with sub-pixel pace for pixel subdivision. So a grayscale matrix inversion was computed in the post-detection processing and used to realize super resolution reconstruction. Finally it is proved that the super resolution reconstruction with special-shaped-pixel detectors should enhance spatial resolution further.

**Key words:** Special-shaped-pixel detectors; Super resolution reconstruction; Pixel subdivision

## 0 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。

分辨率反映了系统分辨物体细节或者能分辨两个靠近点的能力,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爱里斑的半径,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<sup>[1]</sup>;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。当光学系统和探测器匹配时,除了主动毫米波这样波长较长的系统外,大多数系统的空间分辨率都将严格受限于探测器。

提高探测器空间分辨率的最直接方法就是减少探测器的像元尺寸,增加探测器数目。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,分辨率越高。采用小像元尺寸的探测器芯片,可以充分挖掘光学系统的潜力,其缺点是受相机光学相对孔径、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,不可能无限减少。并且随着探测器像元尺寸减少,散粒噪声也将会增大,另外还会产生串音。现有的探测器制造技术几乎接近这个极限值。

为了有效地提高空间分辨率,各个国家的研究人员一直在探索超分辨成像理论与方法。例如从最初的微扫描技术到目前广泛用于传输型航天遥感相机的

亚像元技术<sup>[2-10]</sup>等等。上述方法不增加探测器数目便可解决采样频率不足的问题,以此来提高探测器的空间分辨率,这一类方法称为超分辨重建技术<sup>[11]</sup>。

但是当可分辨的两个等亮度点源足够靠近时,单个点光源经成像系统(光学系统和探测器的感光区)后得到的弥散斑尺寸也会影响系统的空间分辨率。所以,探测器的空间分辨率并不完全取决于采样作用,还取决于探测器的感光区孔径效应所引起的截止频率。

文中提出一种利用赋形像元探测器实现超分辨重建的方法,不增加探测器数目便可以有效提高探测器的截止频率和采样频率,使之更好地与光学系统匹配,进一步提高系统空间分辨率。

## 1 超分辨重建

通常,采用频谱中可获取的最高有效频率值 $f_{\text{sys}}$ 来表征系统的空间分辨率。目标场景经光学系统成像到探测器,探测器中的像元感光区域内积分光信号,然后探测器利用其像元位置对接收到的模糊光学图像进行采样、量化转化为离散数字信号。该光电成像的物理过程中,影响系统的最高有效频率值 $f_{\text{sys}}$ 的特征频率值为:(1)光学系统将输入光谱高频信息限制至光瞳脉冲响应的截止频率 $f_{\text{oco}}$ ;(2)探测器中感光区脉冲响应的截止频率 $f_{\text{dco}}$ ;(3)探测器为离散成像器件,采样系统的采样特性决定了可真实重建的最高频率 $f_{\text{N}}$ 为采样频率的一半。 $f_{\text{sys}}$ 就取决于 $f_{\text{oco}}$ 、 $f_{\text{dco}}$ 和 $f_{\text{N}}$ 3个空间频率的最小值:

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

式中: $\lambda$ 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; $d$ 为探测器中像元的尺寸,即采样间距。

除了波长较长的系统外,大多数系统的空间分辨率都取决于 $f_N$ 。系统采样频率不足,导致系统对光学图像采样时不满足采样定理,高于Nyquist频率的高频信息都将对折混入低频中的信息产生混淆<sup>[12]</sup>。超分辨重建技术正是针对消减欠采样引起的折叠混淆效应,将多幅欠采样图样融合、重建为一幅图像来减少采样间距、提高Nyquist频率,从而重建高分辨图像。

就某一固定感光区尺寸而言,当超分辨重建技术使Nyquist频率不小于探测器的截止频率 $f_{\text{dc}}$ 时,系统的空间分辨率将不再受Nyquist频率限制,而取决于探测器的截止频率,那么采用更加复杂的超分辨重建技术来获取更高的采样频率已经没有太多的实际意义了。

若想进一步获取系统的更高空间分辨率,就必须减少探测器感光区的孔径效应,即提高探测器的截止频率。

## 2 赋形像元探测器

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。所以,减少探测器的像元尺寸是提高探测器空间分辨率最直接的方法。该方法同时提高Nyquist频率和探测器的截止频率,但是,由于减少感光面积而减少了探测器的辐射通量,降低了灵敏度,尤其是红外系统,对探测器的感光面积有一定限制。

为了有效地提高探测器的空间分辨率,并且平衡系统的其他性能指标,借鉴巴比涅原理中的互补屏,改变原有的正矩形像元的几何参数。互补屏是其中一个屏的开孔部分正好对应另一个屏的不透明部分,如果把两部分分次放在物和像之间,则除了原点附近外,均可得到相同的像面光分布函数<sup>[13]</sup>。

将现有的线阵探测器阵列的像元进行抠块。每个像元都去掉一小部分,在这里,去除了像元的1/4,如图1所示。那么就单个方向而言,像元感光区的空域

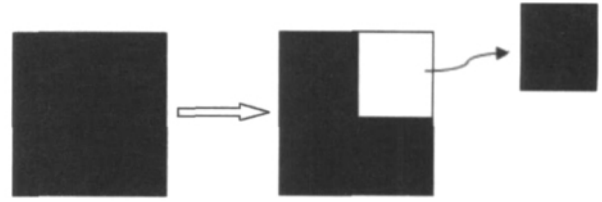


图1 赋形像元概念图

Fig.1 Concept diagram of special-shaped pixel

坐标减小了1/2,其频域带宽应相应增加2倍。由于探测器感光区单个像元感光区内满足线性空间不变性,其孔径效应就是场分布函数<sup>[14]</sup>。为了验证赋形像元将截止频率提高2倍,应用线性叠加原理以及连续傅里叶变换推导出赋形像元感光区的场分布函数。假设像元坐标如图2所示。

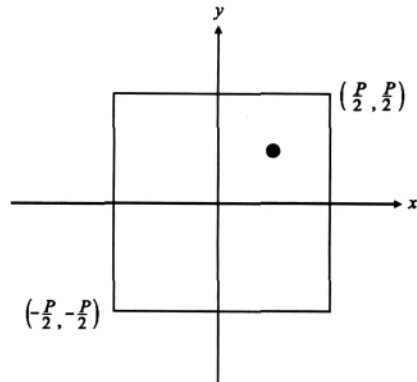


图2 像元坐标图

Fig.2 Coordinate diagram of the pixel

正矩形像元的场分布函数为:

$$F^{-1} \left( \frac{1}{P^2} \text{rect} \left( \frac{x}{P} \right) \text{rect} \left( \frac{y}{P} \right) \right) = \text{sinc}(Pf_x) \text{sinc}(Pf_y) \quad (2)$$

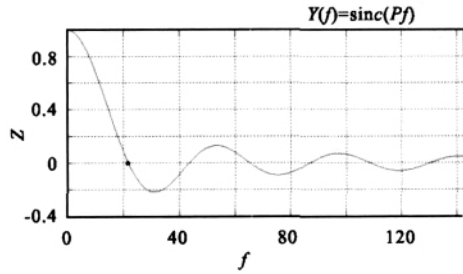
而赋形像元的场分布函数为:

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

所采用的原红外探测器的像元尺寸为 $46 \mu\text{m} \times 46 \mu\text{m}$ ,利用Matlab模拟公式(2)和公式(3)的场分布

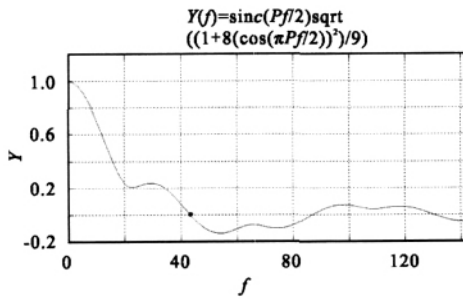
曲线。图3(a)为正矩形像元的场分布曲线;图3(b)为去掉1/4面积后赋形像元的场分布曲线;图3(c)

为  $23\ \mu\text{m} \times 23\ \mu\text{m}$  的正矩形像元的场分布曲线。可以看出:就空间分辨率而言,赋形像元的截止分辨率提升一倍,可以等效于  $23\ \mu\text{m} \times 23\ \mu\text{m}$  的像元。虽然曲线不及  $23\ \mu\text{m} \times 23\ \mu\text{m}$  像元理想,但是其辐射面积为后者的 3 倍,可以有效地平衡其他性能参数,例如灵敏度等,所以,综合整体性能来看,赋形像元探测器更占优势。



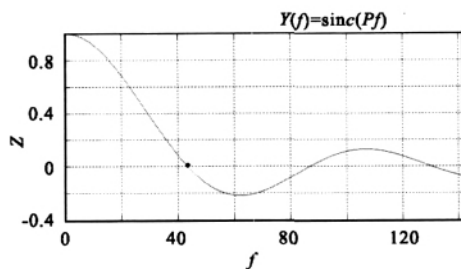
(a)  $46\ \mu\text{m} \times 46\ \mu\text{m}$  正矩形像元的场分布

(a) Field distribution of  $46\ \mu\text{m} \times 46\ \mu\text{m}$  rectangle pixel



(b) 赋形像元的场分布

(b) Field distribution of special-shaped pixel



(c)  $23\ \mu\text{m} \times 23\ \mu\text{m}$  的正矩形的场分布

(c) Field distribution of  $23\ \mu\text{m} \times 23\ \mu\text{m}$  rectangle pixel

图 3 3 种探测器像元的场分布

Fig.3 Field-distribution graphs of three detectors

### 3 实验设计

为了实现赋形像元的超分辨率成像,将两列完全相同的赋形像元探测器集成到一块芯片上,只将其中一列翻转  $180^\circ$ ,与另一列相隔  $N$  个像元的距离并排放

置,如图 4 所示。采用 TDI 推扫方式工作,将步长控制在 0.5 个像元的距离,获得  $2N$  个图像,两列探测器每  $1/4$  像元位置连续得到的灰度值如图 5 所示。那么结合图 4 和图 5 可以看出:由于两列探测器像元去掉部

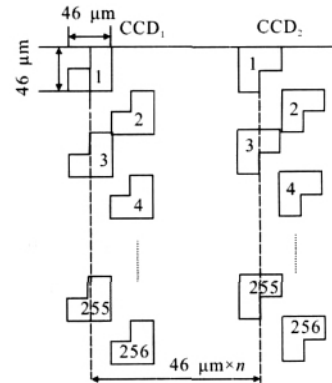


图 4 视场拼接

Fig.4 Field butting

$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$		$a_{1R}$
$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{24}$	$a_{25}$		$a_{2R}$

图 5 在扫描方向上每次推扫积分的灰度值

Fig.5 Grayscale values obtained by each scanning in scanning direction

分的位置不相同,所以,针对同一点采样,像元的输出也不同。根据两列探测器得出的不同的帧图,可以计算出  $1/4$  像元对应的灰度,如公式(4)所示,那么就可以重建出细分一倍的图像,例如,宽度为像元尺寸一半的红外靶标图像。该分辨率是过采样技术无法实现的,经过  $N$  次亚像元采样,其输出的灰度值均相等,如公式(5)和公式(6)所示,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。

$$y_{\text{left1}} = \frac{1}{3} (a_{12} + a_{21} + a_{22}) \quad y_{\text{right1}} = \frac{1}{3} (a_{11} + a_{12} + a_{21})$$

$$y_{\text{left2}} = \frac{1}{3} (a_{13} + a_{22} + a_{23}) \quad y_{\text{right2}} = \frac{1}{3} (a_{12} + a_{13} + a_{22})$$

$$y_{\text{left3}} = \frac{1}{3} (a_{14} + a_{23} + a_{24}) \quad y_{\text{right3}} = \frac{1}{3} (a_{13} + a_{14} + a_{23})$$

$$\vdots$$

$$y_{\text{leftn}} = \frac{1}{3} (a_{1n} + a_{2,n-1} + a_{2n}) \quad y_{\text{rightn}} = \frac{1}{3} (a_{1,n-1} + a_{1n} + a_{2,n-1})$$

(4)

$$y_1 = \frac{1}{4} (a_{11} + a_{21} + a_{12} + a_{22})$$



$$y_2 = \frac{1}{4} (a_{12} + a_{22} + a_{13} + a_{23})$$

$$y_3 = \frac{1}{4} (a_{13} + a_{23} + a_{14} + a_{24})$$

$$\vdots$$

$$y_n = \frac{1}{4} (a_{1,n-1} + a_{2,n-1} + a_{1n} + a_{2n}) \quad (5)$$

$$y_1 = y_2 = y_3 = \cdots = y_n \quad (6)$$

#### 4 实验结果

为了验证赋形像元探测器超分辨成像的有效性,采用红外镜头对无穷远标准红外鉴别率板(高对比度)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。

实验装置如图6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,为了避免推扫成像过程中带来的像移,转台的转速与探测器的行转移频率的关系要满足:

$$\omega = (d/2)v \quad (7)$$

式中: $d$ 为像元的尺寸,即  $46 \mu\text{m}$ ;  $v$ 为红外探测器的行转移频率; $\omega$ 为转台转动的角速度。

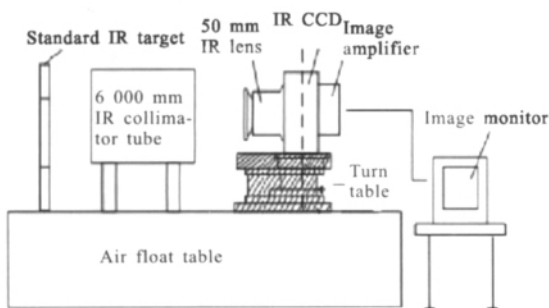


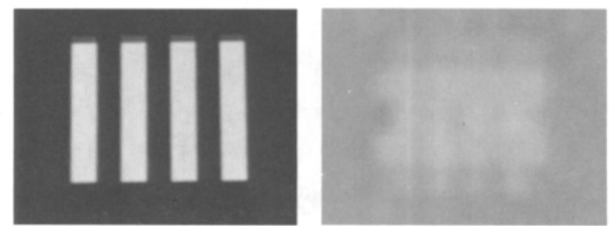
图6 实验装置

Fig.6 Experimental setup

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  $\alpha$ , 红外镜头焦距为  $f_2$ , 则 CCD 的分辨率  $R$  为:

$$R = \alpha \frac{f_2}{f_1} \quad (8)$$

实验中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为  $6\,000 \text{ mm}$ , 口径为  $600 \text{ mm}$ ; 中波红外镜头的焦距为  $50 \text{ mm}$ 。如果不采用任何技术, 该物方分辨率为  $11.04 \text{ mm}$ ; 过采样技术可将分辨率提高  $1.60$  倍<sup>[15]</sup>, 分辨率为  $6.9 \text{ mm}$ ; 而利用赋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, 只有  $3.1 \text{ mm}$  的标准靶标, 图7(a)所示, 而图7(b)为经过该系统



(a) 间隔为3.1 mm的靶标 (b) 最终图像  
(a) Targets at intervals of 3.1 mm (b) Ultimate image

图7 实验结果

Fig.7 Experimental result

重建的最终图像。由于实验经费有限, 选取了性能较低的探测器芯片, 并且第一次将矩形探测器像元加工成“赋形”, 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  $3.1 \text{ mm}$  靶标来讲, 利用过采样技术是无法分辨的, 可见应用赋形像元探测器成像方法的价值。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。

#### 5 结论

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。

利用赋形像元探测器的超分辨重建方法就是在足够采样频率的情况下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。可以看出: 只有充分实现各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。

超分辨成像技术一直是光电成像领域重要的研究方向之一,我们将继续探索新理论、新技术在实际设计中的运用,实现综合设计、优化光电系统,从而获取尽可能高的系统空间分辨率的目标。

#### 参考文献:

- [1] YU Dao-Yin, TAN Heng-ying. **Engineering Optics** [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press (郁道银, 谈恒英. 工程光学. 第2版. 北京: 机械工业出版社), 2006: 195.
- [2] ABRAHAM F. Microscan in infrared staring systems [J]. **Optical Engineering**, 1997, **36**(7): 1745–1749.
- [3] WANG Xiao-rui, HU Fang-ming, ZHANG Jian-qi, et al. Research on the FPA imaging character based on microscanning [J]. **Journal of Xidian University** (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. 西安电子科技大学学报(自然科学版)), 2005, **32**(3): 392–397.
- [4] FANNING J D, REYNOLDS J P. Target identification performance of superresolution versus dither [C]// **Proceedings of SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XIX**, 2008, **69410N**: 1–12.
- [5] JIN Wei-qi, CHEN Yi-nan, WANG Xia, et al. Scanning type sub-pixel thermal imaging algorithm taking account of detector filling rate and micro-scanning contraposition bias [J]. **J Infrared Millim Waves** (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. 红外与毫米波学报), 2008, **27**(4): 308–312.
- [6] ZHOU feng, WANG Shi-tao, WANG Huai-yi. Study of several points about subpixel imaging technology [J]. **Spacecraft Recovery & Remote Sensing** (周峰, 王世涛, 王怀义. 关于亚像元成像技术几个问题的探讨. 航天返回与遥感), 2002, **23**(4): 26–33.
- [7] YANG Hua, GUO Yue, FU Rui-min. Study on field butting of TDICCD [J]. **Optical Technique** (杨桦, 郭悦, 伏瑞敏. TDICCD 的视场拼接. 光学技术), 2003, **29**(2): 226–228.
- [8] XU Zhi-hai, FENG Hua-jun. Overview of research approaches for ultrahigh-resolution optoelectronic imaging [J]. **Infrared and Laser Engineering** (徐之海, 冯华君. 超高分辨率光电成像技术的研究进展. 红外与激光工程), 2006, **35**(4): 456–463.
- [9] ZHU Jia-jia, WEN De-sheng, QIAO Wei-dong, et al. Method for composing two images of TDICCD sub-pixel camera [J]. **Acta Optica Sinia** (朱家佳, 汶德胜, 乔卫东, 等. 一种 TDICCD 亚像元合成方法. 光子学报), 2007, **36**(5): 933–936.
- [10] ZHANG Zhi, XIA De-shen, SUN Quan-sen. Wavelet interpolation and filtering of subpixel remote sensing image [J]. **Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)** (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. 南京理工大学学报(自然学科版)), 2008, **32**(2): 195–198.
- [11] DRIGGERS R G, KRAPELS K, YOUNG S. The meaning of super-resolution [C]// **Proceedings of SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVI**, 2005, **5784**: 103–105.
- [12] GOODMAN J W. **Introduction to Fourier Optics** [M]. 3th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (古德曼. 傅里叶光学导论. 第3版. 北京: 电子工业出版社), 2006: 20.
- [13] BORN M, WOLF E. **Principles of Optics** [M]. 7th ed. London: Cambridge University Press, 1999: 458.
- [14] BARNARD K J, BOREMAN G D. Modulation transfer function of hexagonal staring focal plane arrays [J]. **Optical Engineering**, 1991, **30**(12): 1915–1919.
- [15] CHE Shuang-liang, WEN De-sheng. The space resolution of dynamic subpixel imaging system [J]. **Acta Optica Sinia** (车双良, 汶德胜. 亚像元动态成像系统空间分辨率研究. 光子学报), 2001, **30**(11): 1418–1420.