

## 像素感光面形状对基于微扫描的红外超分辨成像的影响

孙鸣捷, 于康龙, 孟照魁

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 基于微扫描的超分辨成像技术在成像系统光学参数不变的基础上提高图像分辨率, 常用于红外成像领域。目前, 在基于微扫描的红外超分辨成像研究中, 采用理想的正方形模型来仿真红外探测器的感光面形状。但是, 由于读出电路的存在, 实际探测器产品中像素感光面形状并非严格的正方形, 使用正方形模型仿真会导致仿真结果和研究结论的不准确。推导了长方形和“折形”两种感光面模型对成像的影响, 并通过与正方形模型的仿真对比确定相应的误差, 最后结合实验对前述研究成果进行了验证。结果表明: 极限情况下, 相对于“折形”模型, 使用方形模型仿真的误差高达 41%; 相同像素填充率时, “折形”感光面越远离中心, 对成像的 MTF 影响越大; 基于探测器真实感光面形状的仿真模型能有效提高对红外超分辨成像研究的准确性。

**关键词:** 超分辨成像; 微扫描; 像素感光面形状; 调制传递函数

**中图分类号:** TP911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3183-05

## Effect of pixel active area shapes in microscanning based infrared super-resolution imaging

Sun Mingjie, Yu Kanglong, Meng Zhaokui

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Super-resolution (SR) imaging is an effective and economical way to increase the image resolution in spite of the detector limitation, therefore is widely used in many infrared (IR) focal plane array (FPA) imaging application. The ideal square pixel active area (PAA) model is widely used in research of microscanning (MS) based IR SR imaging. However, according to the micrographs of practical IRFPA productions, the PAAs of these productions are actually not a strict square. Three different PAA shapes were analyzed to discuss their effect in MS based IR SR imaging, and experimental results were coincident to theoretical simulation. The results indicate that: using square PAA causes 41% inaccuracy in some limit cases; more closer the "Z shape" to rectangle, higher value of "Z shape" MTF; simulation model based detector active area shape can effectively improve accuracy for IR SP research.

**Key words:** super-resolution (SR) imaging; microscanning; pixel active shape; MTF

收稿日期: 2014-02-09; 修订日期: 2014-03-10

基金项目: 国家青年自然科学基金(61307021)

作者简介: 孙鸣捷(1982-), 男, 博士, 主要从事电光成像方面的研究。Email: 09559@buaa.edu.cn

## 0 引言

超分辨成像技术是指将由微扫描获得的相互关联的多幅低分辨率图像重建成一幅高分辨率图像的一种成像技术。该技术在成像系统光学参数不变的基础上由微扫描实现超越系统衍射极限的图像分辨率,特别适用于探测器像元尺寸大、器件成本昂贵的成像系统性能提升,因此被广泛用于红外成像领域<sup>[1-3]</sup>及航天遥感领域<sup>[4]</sup>。超分辨成像的关键技术之一是将图像位移控制在亚像素(几到几十微米)量级。

目前对于超分辨成像的研究大部分是建立在仿真的基础上,很少涉及到实际成像,而实际成像系统中成像探测器的感光面并不能填满整个探测器单元。

Hock<sup>[5]</sup>第一次研究了微扫描对探测器阵列成像的影响,并提出了像素传递函数(PTF)的概念。他假设像素感光面(PAA)为正方形(如图 1(a)所示)。此后,大多关于超分辨成像微扫描技术的研究均采用这一假设,并在相关领域取得许多进步。比如, Gillete 等人研究了采用微扫描的红外成像以减少图像的频率混叠<sup>[6]</sup>。Hadar 和 Boreman 讨论了微扫描对系统调制传递函数(MTF)的提升作用<sup>[7]</sup>。Krapels 等人比较了方形四点扫描和对角两点扫描的差别<sup>[8]</sup>。Miller 和 Wiltse 分析了微扫描技术对红外成像的实际效果<sup>[9]</sup>。Wang 等人测量了微扫描显微镜的 MTF 曲线<sup>[10]</sup>。王晓蕊等人研究了红外探测器填充率对微扫描的影响<sup>[11]</sup>并提出了基于微扫描的积分成像技术<sup>[12]</sup>。Li 等人提出了基于微扫描的无透镜数字全息<sup>[13]</sup>。隋修宝等人分析了微扫描中平行平板参数的影响<sup>[14]</sup>。上述这些研究都是基于像素感光面为正方形这一假设的。

事实上,由于外围电路的存在和半导体工艺的限制,实际红外探测器产品的像素感光面并不是严格意义上的正方形,如图 1(b)和图 1(c)所示。因此,前述研究的仿真和分析可能不够精确。文中基于不同的像素感光面形状建立红外超分辨成像模型,研究不同像素感光面形状对于红外超分辨成像质量的影响。

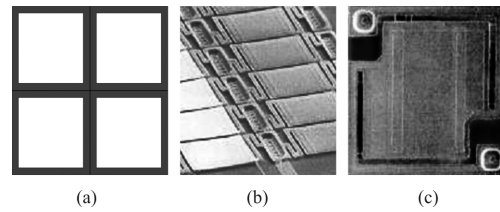


图 1 理想及实际红外探测器的像素感光面

Fig.1 PAA of an ideal and real IRFPA

## 1 理论推导

MTF 是研究成像系统性能最常用的评价函数之一。红外超分辨成像系统的 MTF 主要由探测器积分平均的 MTF、微扫描采样的 MTF 和红外镜头的 MTF 三部分决定。文中研究微扫描和探测器相关的影响,因此将研究中被考察的系统 MTF 函数定义为:

$$MTF_{total} = A_{PAA} / A_{pixel} MTF_{FPA}(u, v) \times MTF_{MS}(u, v) \quad (1)$$

式中:  $A_{PAA}$  和  $A_{pixel}$  分别为感光面和像素栅格的面积;  $u$  和  $v$  分别为横向和纵向的空间频率。

首先,对不同形状的  $MTF_{FPA}(u, v)$  进行分析。为了确保像素的感光面形状是唯一的影响因素,假设像素的感光面面积相同,红外探测器阵列的填充率  $f = A_{PAA} / A_{pixel}$ , 像素间距为  $p$ 。图 2(a)为理想正方形,在之前研究中广泛应用,文中将用于对比分析;图 2(b)为长方形,用于模拟图 1(b)产品的形状,其长为  $p$ , 宽为  $fp$ ;图 2(c)为“折形”,用于模拟图 1(c)产品的形状,不管形状如何,直角坐标系的原点建立在像素中心,其中对于“折形”,为简单起见,折形感光面为中心对称,定义  $k$  为折形感光面的形状因子,上半部分右边缘和下半部分左边缘距离像素边缘距离均为  $kp$ 。三种形状的具体尺寸参数均在图 2 中做了相应标注。

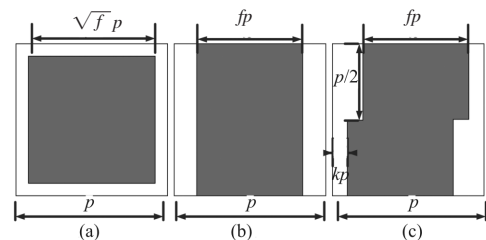


图 2 (a) 正方形感光面, (b) 长方形感光面, (c) “折形”感光面

Fig. 2 (a) Square PAA, (b) Rectangle PAA, (c) "Z" shape PAA

对不同形状,均采用统一的归一化函数表示:

$$p = \begin{cases} 1/fp^2 & \text{for } (x,y) \text{ inside PAA} \\ 0 & \text{for } (x,y) \text{ outside PAA} \end{cases} \quad (2)$$

对于上述三种不同的形状,分别进行二维傅里叶变换:

$$MTF_{Square}(u,v) = f \operatorname{sinc}(\pi u f^{1/2} p) \operatorname{sinc}(\pi v f^{1/2} p) \quad (3)$$

$$MTF_{Rectangle}(u,v) = f \operatorname{sinc}(\pi u f p) \operatorname{sinc}(\pi v p) \quad (4)$$

$$MTF_{"Z" shape}(u,v) = f \operatorname{sinc}(\pi u f p) \operatorname{sinc}(\pi v f p / 2) \times \cos[\pi u (f + 2k - 1)p - \pi v p / 2] \quad (5)$$

之后,对  $MTF_{MS}(u,v)$  进行变换。目前常见的微扫描方式包括  $2 \times 2$ 、 $3 \times 3$ 、 $4 \times 4$  和  $5 \times 5$  四种,分别对应图像的亚像素平衡量为  $p/2$ 、 $p/3$ 、 $p/4$  及  $p/5$ 。假设  $n$  为微扫描模式(1 对应不采用微扫描,2 对应  $2 \times 2$  模式,依次类推),根据参考文献[4]可知,针对有限尺寸的像素来说,红外探测器阵列的采样 MTF 为:

$$MTF_{sampling}(u,v) = \operatorname{sinc}(\pi u p) \operatorname{sinc}(\pi v p) \quad (6)$$

微扫描过程等同于过采样过程,因此不同的微扫描模式对应的红外探测器阵列的采样 MTF 为:

$$MTF_{MS}(u,v) = \operatorname{sinc}(\pi u p / n) \operatorname{sinc}(\pi v p / n) \quad (7)$$

其中, $n=1$  对应于无扫描模式,此时公式(7)的  $MTF_{MS}(u,v)$  等于公式(6)  $MTF_{sampling}(u,v)$ 。

将公式(3)~(5)与公式(7)分别代入公式(1),得到不同感光面形状的系统 MTF 为:

$$MTF_{totalSq}(u,v) = f \operatorname{sinc}(\pi u p / n) \operatorname{sinc}(\pi v p / n) \times \operatorname{sinc}(\pi u f^{1/2} p) \operatorname{sinc}(\pi v f^{1/2} p) \quad (8)$$

$$MTF_{totalRec}(u,v) = f \operatorname{sinc}(\pi u p / n) \operatorname{sinc}(\pi v p / n) \times \operatorname{sinc}(\pi u f p) \operatorname{sinc}(\pi v p) \quad (9)$$

$$MTF_{totalZ}(u,v) = f \operatorname{sinc}(\pi u p / n) \operatorname{sinc}(\pi v p / n) \times \operatorname{sinc}(\pi u f p) \operatorname{sinc}(\pi v f / 2) \times \cos[\pi u (f + 2k - 1)p - \pi v p / 2] \quad (10)$$

## 2 仿真分析

基于上述推导,仿真不同感光面形状,形状因子  $k$  和扫描模式  $n$  情况下的系统 MTF。仿真中,红外探测器的填充率  $f=60\%$ ,像素间距  $p=35 \mu\text{m}$ ,空间频率取奈奎斯特频率,即  $u=v=1/(2p)$ 。同时将填充因子 100%的理想方形探测器的 MTF 值归一化为曲线

纵坐标。

图 3 所示曲线由公式(8)~(10)计算所得,其代表了不同感光面形状在不同扫描模式下的系统 MTF 情况。由曲线可知,三种形状的系统 MTF 值均随微扫描模式的增加而变大,且当微扫描模式数从 1 变为 2 时,系统 MTF 提升最大。此外,当微扫描模式  $n \geq 2$  时,三种感光面形状的系统 MTF 均大于 1。这表明,基于微扫描的超分辨成像可以获得比理想探测器直接成像更好的图像。

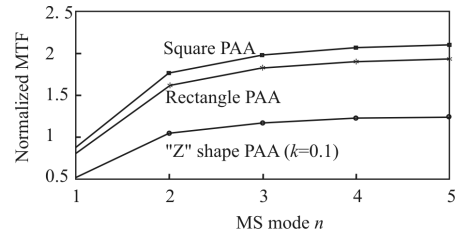


图 3 不同形状的归一化 MTF 随扫描模式数变化曲线

Fig.3 Normalized MTF as a function of MS mode for different PAA shapes

此外,三种感光面形状的系统 MTF 曲线中,理想正方形的 MTF 值最大,长方形感光面 MTF 值是其的 92%,而“折形”感光面 MTF 值仅是其的 59%。这一结果表明,采用理想正方形作为感光面模型来研究超分辨成像技术会造成仿真结果的不准确。以中国广微积电公司的 GW20020131A 探测器(见图 1(c)),使用正方形模型和折型模型存在 41%(100%–59%=41%)的误差。

图 4 所示曲线由公式(10)计算所得,分析“折形”形状因子  $k$  改变对系统 MTF 值的影响。仿真中探测器填充率  $f=0.6$ ,因此形状因子  $k$  的取值范围是  $0 \leq k \leq 0.4$ ;此外,由于“折形”的上、下部分感光面沿水平方向移动,此仿真中纵向空间频率  $v=0$ 。图 4 曲线表明,无论  $k$  取值如何,系统 MTF 值总是随着微扫描模式的增加而变大,当微扫描模式从 1 变为 2 时,系统 MTF 提升最大。对于同一微扫描模式, $k$  从 0 逐渐增加到 0.2 时,MTF 值随着  $k$  的增加而变大,而  $k$  从 0.2 增大到 0.4 时,MTF 值随着  $k$  的增加而减小。当  $k=0$  和  $k=0.4$  时,MTF 有最小值; $k=0.2$  时,系统 MTF 有最大值,此时“折形”演化为长方形,数值计算的结果也与公式(9)计算的相吻合。仿真结果表明,感光面越远离像素中心,系统 MTF 值越小。

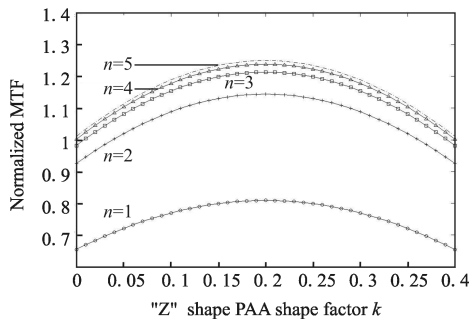


图 4 “折形”的归一化 MTF 随  $k$  值的变化曲线(5 种微扫描模式)

Fig. 4 Normalized MTF of "Z" shape PAA as a function of shape factor  $k$  for five MS modes

### 3 实验验证

为进一步验证仿真结果,通过实验测量基于微扫描的红外超分辨成像系统的 MTF。测试系统如图 5 所示,包含差分黑体辐射源和控制仪,不同空间频率的光栅靶标,红外平行光管成像设备和一台分析计算机。红外超分辨成像系统如图 6(d)所示,系统由红外成像镜头,微扫描装置及红外探测器阵列组成。图 6(a)为红外成像镜头,其工作波段为 8~12  $\mu\text{m}$ ,焦距为 25 mm,通光口径为 40 mm,镜头的 MTF 曲线由生产商提供。微扫描装置如图 6(b)所示,采用旋转斜置平行平板实现微扫描,微扫描模式为  $2\times 2$ ,平行平板由锆制作,在 10  $\mu\text{m}$  处的折射率为 4.000 287,安装倾斜角度为  $1^\circ$ ,平板厚度为 0.47 mm,平行平板斜置于成像光路中,沿光轴旋转使得系统像面相对于探测器产生亚像素位移,实现微扫描。红外探测器阵列采用的是广微积电公司的面阵红外探测器 GW20020131A,其分辨率为  $384\times 288$ ,工作波段为 8~12  $\mu\text{m}$ ,填充率为 70%,像素间距  $p=35 \mu\text{m}$ 。

实验系统如图 7 所示,不同的光栅靶标被黑体源照射,经过红外成像透镜和微扫描装置后,在红外探测器阵列上成像。为计算红外微扫描成像系统在不同频率处的 MTF 值,实验中测量了 2、4、6、8、10 线对处的系统 MTF 值,除去红外镜头在相应频率的 MTF 值,即可得到与公式(1)定义一致的 MTF 值。实验结果如图 8 所示,结果表明,正方形感光面的仿真结果与实验结果之间存在 34% 的差别,而“折形”感光面与实验只有 10% 的差别。由于实验结果在低频条件下获得的,比第三节仿真中的仿真结果的差别要小。总之,对于采用广微积电公司的

红外探测器 GW20020131A 进行红外超分辨成像而言,采用“折形”感光面作为成像模型来分析系统的 MTF 比采用理想正方形感光面要更加准确。

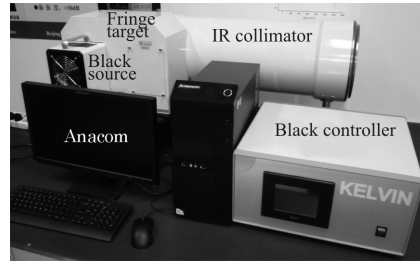


图 5 Kelvin-XT1 红外成像 MTF 测试系统, Kelvin Inc(中国)

Fig.5 Kelvin-XT1 IR MTF measuring system, Kelvin Inc (China)

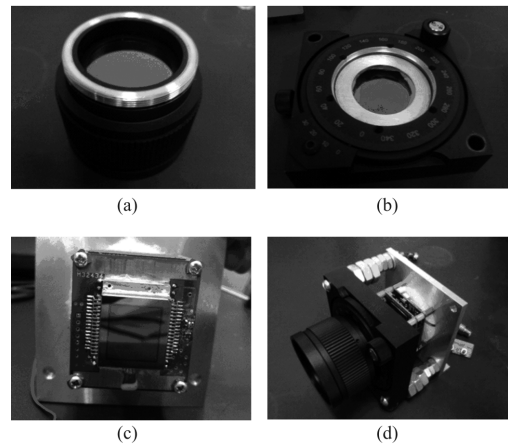


图 6 (a) 红外成像镜头, (b) 微扫描装置, (c) 广微积电公司的红外探测器, (d) 红外超分辨成像系统

Fig.6 (a) IR imaging lens, (b) MS device, (c) GWIR020131A IRFPA, GWIC Inc., China, (d) Experimental IR SR imaging system

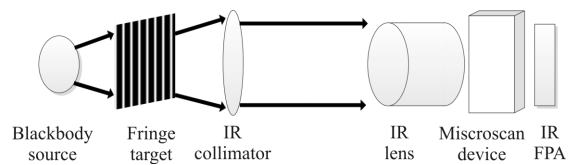


图 7 实验系统示意图

Fig.7 Scheme of experimental system

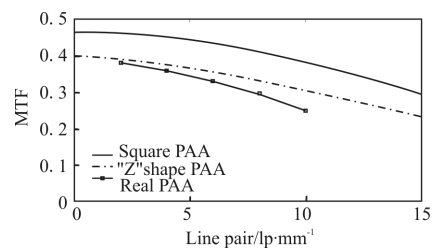


图 8 理想和真实红外探测器的 MTF 随空间频率变化的曲线  
Fig.8 Total MTF vs. line pair (for different PAA models and real FPA)

## 4 结 论

文中讨论了不同感光面形状对红外超分辨成像系统 MTF 的影响,推导了理想正方形、长方形及“折形”三种感光面形状的 MTF 表示。结合不同的微扫描模式,推导了相应感光面形状时的红外超分辨成像系统 MTF。

仿真结果表明,对于同一微扫描模式,长方形和“折形”感光面的系统 MTF 分别是理想正方形感光面系统 MTF 的 92%和 59%。换言之,若采用理想感光面模拟红外超分辨成像的系统 MTF,仿真结果与实际情况会有 41%的误差。此外,“折形”感光面的形状因子  $k$  的改变对系统 MTF 影响较大,当“折形”感光部分偏离中心越远时,系统 MTF 值越低。

实验结果与仿真结果吻合,结果数据表明采用“折形”感光面计算系统 MTF 的结果准确度比采用理想正方形的提高了 24%。因此,在将来与红外超分辨成像等相关的研究过程中采用基于真实感光面形状模型做仿真分析有助于提高仿真精确度。

### 参考文献:

- [1] Wiltse J M, Miller J L. Imagery improvements in staring infrared imagers by employing subpixelmicroscan[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(5): 056401.
- [2] Bergeron A, Noc L L, Tremblay B, et al. Flexible 640x480 pixel infrared camera module for fast prototyping[C]//SPIE, 2009, 7481: 74810L.
- [3] Noc L L, Dufour D, Terroux M, et al. Towards a very high-resolution infrared camera core[C]//SPIE, 2011, 8012: 80123P.
- [4] Chen Boyang, Guo Qiang, Chen Guilin, et al. Amolificatory noise raised by super resolution image reconstruction and filter [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2011, 30(1): 15-21. (in Chinese)  
陈博洋,郭强,陈桂林,等.超分辨率图像重建引起的噪声放大与滤波[J].红外与毫米波学报,2011,30(1):15-21.
- [5] Hock K M. Effect of oversampling in pixel arrays [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(5): 1281-1288.
- [6] Gillete J C, Stadtmiller T M, Hardie R C. Aliasing reduction in staring infrared imagers utilizing subpixel techniques [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(11): 3130-3137.
- [7] Hadar O, Boreman G D. Oversampling requirements for pixelated-imager systems[J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(5): 782-785.
- [8] Krapels K, Driggers R, Vollmerhausen R, et al. Performance comparison of rectangular (four-point) and diagonal (two-point) ditherin under sampled infrared focal plane array imagers[J]. *Optica Applicata*, 2011, 40(1): 71-84.
- [9] Miller J L, Wiltse J M. Benefits of microscan for staring infrared imagers[C]//SPIE, 2004, 5407: 127-138.
- [10] Wang Z, Glazowski C E, Zavislan J M. Modulation transfer function measurement of scanning reflectance microscopes[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2007, 12(5): 051802.
- [11] Wang X, Zhang J, Chang H. The effect of fill factor of infrared FPA sensor on microscanning imagery quality [C]//SPIE, 2005, 5640: 417-424.
- [12] Wang X, Hua H. Theoretical analysis for integral imaging performance based on microscanning of a microlens array[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(5): 449-451.
- [13] Li Y, Lilley F, Burton D, et al. Evaluation and benchmarking of a pixel-shifting camera for superresolution lensless digital holography [J]. *Optica Applicata*, 2010, 49(9): 1643-1650.
- [14] Sui X, Bai L, Chen Q, et al. Influencing factors of microscanning performance based on flat optical component [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(5): 052302.