填充因子对微扫描系统成像质量影响分析

沈同圣[1],史浩然[2],娄树理[3],李召龙[2]

(1. 中国国防科技信息中心,北京 100142;
2. 海军航空工程学院 研究生管理大队,山东 烟台 264001;
3. 海军航空工程学院 控制工程系,山东 烟台 264001)

摘 要: 填充因子是探测器阵列设计的一个重要参数, 因此有必要研究填充因子对微扫描系统成像质量的影响。以 2×2 微扫描方式为例,在详细分析微扫描技术能够减少由探测器欠采样造成的混淆效应的基础上,仿真了不同填充因子下的输出图像,引进结构相似度(SSIM)的评价指标,从图像质量评价的角度对仿真图像进行定量分析。仿真结果表明填充因子的增大能够减少混淆效应,提高成像质量。指出探测器填充因子的增大虽然能提高成像质量,但是对成像质量的影响是有限的,对图像的改善程度不大,并不是影响像质的主要因素,这对微扫描成像系统的设计提供了理论和应用参考。

关键词: 红外成像系统; 微扫描; 填充因子; 结构相似度; 混淆效应

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2292-06

Analysis of the effects of fill factor on image quality of micro-scanning system

Shen Tongsheng[1], Shi Haoran[2], Lou Shuli[3], Li Zhaolong[2]

(1. National Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100142, China;
2. Postgraduate Training Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;
3. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Fill factor is an important parameter for the design of detector arrays, and it′s necessary to research fill factor influence on image quality of micro-scanning system. One model of micro-scanning (2×2) as an example, on the basis of the detailed analysis of micro-scanning can reduce aliasing which is created by detector due to under sampling, output images were simulated with the case of different fill factors. Quantitative analysis on the simulation images from the perspective of image quality assessment was based on structure similarity. The simulation results show that the increase of fill factor can reduce aliasing effect and improve the quality of imaging. Pointed out that fill factor of detector can improve the quality of the image, but the influence on image quality is limited and degree on the improvement of the image was not large, which provide the theoretical and applied research for the design of micro-scanning imaging system.

Key words: infrared imaging system; micro-scanning; fill factor; structure similarity; aliasing effect

收稿日期: 2014-12-05; **修订日期:** 2015-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(61303192);“十二五”总装预研项目(51303020403-3)

作者简介: 沈同圣(1966-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为光电制导、红外图像的生成。Email: shents_cd@163.com

通讯作者: 史浩然(1992-),男,硕士,主要从事红外传感器建模仿真方面的研究。Email: naroahux@163.com

0 引 言

红外焦平面阵列成像技术是当前红外成像系统发展的主流趋势[1]。但是红外焦平面阵列成像技术存在一个重要的问题，由于探测器单元尺寸和探测器间隔的影响,使得图像变得模糊不清,存在锯齿边缘的混淆效应[2],减小混淆效应有以下几种方法:(1)提高探测器的填充因子到 100%;(2) 通过减小视场区域的大小增加采样率;(3)增加探测器探测单元的数量;(4)微扫描技术,以牺牲探测器视场区域为代价提高探测器的采样率显然是不希望得到的，提高探测器的填充因子以及增加探测器探测单元的数量在工艺实现方面相比较微扫描技术而言困难得多。因此微扫描技术是减小探测器混淆效应最有效的方法,也是未来焦平面阵列探测器发展的方向[3]。

探测器的填充因子是红外系统设计的一个重要参数，探讨填充因子对微扫描系统成像的影响为微扫描成像系统的设计提供理论和应用参考。美国 Cincinnatoi 公司研制了填充因子为 25%的 256×256 微扫描系统，成像效果得到了很大的提高。Edward A. Wastoln 等学者采用像素处理的方法对微扫描进行仿真,左月萍[4]等人从光电成像频谱理论对填充因子为 100%的微扫描成像过程进行了仿真,王晓蕊[5]则探讨了不同微扫描方式对成像的影响。然而这些都没有研究探测器填充因子对微扫描成像质量的影响，也没有对成像质量做出定量分析。针对以上问题，文中首先对微扫描技术能够减少混淆效应作了理论上的探讨[6],然后根据 2×2 微扫描方式的成像过程,仿真了不同填充因子下的探测器成像,基于结构相似度的评价指标对仿真图像进行了定量分析。

1 微扫描减少混淆效应的理论分析

微扫描的工作原理是通过对探测器焦平面阵列的轻微移动来实现探测器对场景的多次采样，将得到的一系列的图像像素按照微扫描的方式与顺序进行交叉，得到重建后的图像。微扫描的成像过程有 1×1,2×2,3×3,4×4 四种微扫描方式,下面以 2×2 微扫描方式为例分析微扫描能够减少混淆效应的原因，图 1 表明了 2×2 微扫描方式的具体扫描过程，焦平面阵列移动的顺序为每次移动半个探测器单元的距离。

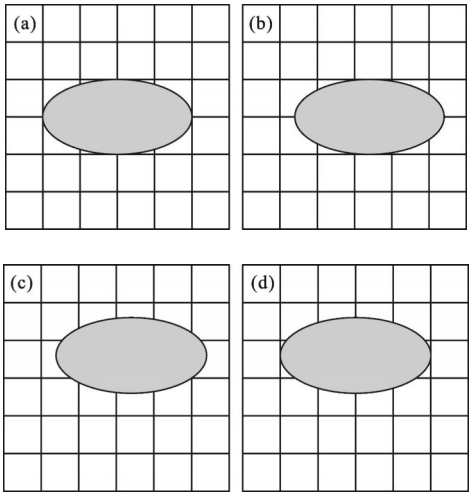


图 1 2×2 微扫描过程

Fig.1 2×2 micro-scanning processing

下面根据 2×2 微扫描成像过程，对微扫描能够减少混淆效应给予理论上的说明。

$I_m(x,y)$为输入的场景图像,通过探测器采样后得到的采样图像为:

$$I_s(x,y;\Delta x,\Delta y)=I_m(x,y)P_s\left[\left(\frac{x}{\Delta x}\right),\left(\frac{y}{\Delta y}\right)\right] \tag{1}$$

式中:Δx、Δy 分别为探测器阵列的水平采样间距与垂直采样间距。理想采样函数如下:

$$P_s\left[\left(\frac{x}{\Delta x}\right),\left(\frac{y}{\Delta y}\right)\right]=\frac{1}{\Delta x\Delta y}\mathrm{comb}\left[\left(\frac{x}{\Delta x}\right),\left(\frac{y}{\Delta y}\right)\right] \tag{2}$$

$$\mathrm{comb}(x,y)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\delta(x-n,y-m) \tag{3}$$

其中梳状函数代表探测器阵列，由有限的均匀冲击响应序列表示。由于探测器探测单元对输入信号具有积分作用,可以得到探测器光敏元函数:

$$d(x,y)=\frac{1}{ab}\mathrm{rect}\left(\frac{x}{a},\frac{y}{b}\right) \tag{4}$$

式中:a,b 为探测器光敏元的大小。场景图像经过探测器的积分采样之后得到的离散图像为:

$$I_s(x,y;\Delta x,\Delta y)=\left[\frac{1}{ab}\mathrm{rect}\left(\frac{x}{a},\frac{y}{b}\right)*I_m(x,y)\right]\times \frac{1}{\Delta x\Delta y}\mathrm{comb}\left[\left(\frac{x}{\Delta x}\right),\left(\frac{y}{\Delta y}\right)\right] \tag{5}$$

根据图 1 中所示的 2×2 微扫描方式，经过微扫描作用后可得到重建后的图像。

$$I_s(x,y;\Delta x,\Delta y)=\frac{1}{4}\left[\frac{1}{ab}\mathrm{rect}\left(\frac{x}{a},\frac{y}{b}\right)*I_m(x,y)\right]\times$$

$$\frac{1}{\Delta x\Delta y}\left\{\mathrm{comb}\left(\frac{x}{\Delta x},\frac{y}{\Delta y}\right)+\right.$$
$$\mathrm{comb}\left(\frac{x}{\Delta x}-\frac{1}{2},\frac{y}{\Delta y}\right)+$$
$$\mathrm{comb}\left(\frac{x}{\Delta x}-\frac{1}{2},\frac{y}{\Delta y}-\frac{1}{2}\right)+$$
$$\left.\mathrm{comb}\left(\frac{x}{\Delta x},\frac{y}{\Delta y}-\frac{1}{2}\right)\right\} \tag{6}$$

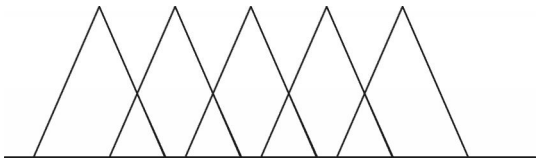
对公式(5)进行傅里叶变换,在频率域可以表示为:

$$I_s(f_x,f_y;\Delta x,\Delta y)=\frac{1}{4}D(af_x,bf_y)I_m(f_x,f_y)*$$
$$\mathrm{comb}(f_x\Delta x,f_y\Delta y)$$
$$\{1+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\pi f_x\Delta x}+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\pi f_y\Delta y}+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\pi(f_x\Delta x+f_y\Delta y)}\} \tag{7}$$

结合公式(3)和公式(5)可以得出:

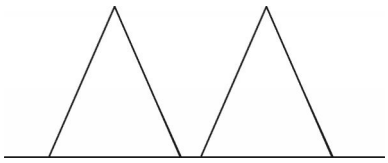
$$I_s(f_x,f_y;\Delta x,\Delta y)=\frac{1}{4}D(af_x,bf_y)I_m(f_x,f_y)*$$
$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\delta(f_x\Delta x-n,f_y\Delta y-m)$$
$$\{1+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\pi n}+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}m}+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\pi(m+n)}\} \tag{8}$$

通过对公式(8)的观察可以看出当 m,n 同时为偶数时,$I_s(f_x,f_y;\Delta x,\Delta y)$不为零;在其他的情况下 $I_s(f_x,f_y;\Delta x,\Delta y)$为零,即是说只有偶数频谱才会引起混淆,在奇数频谱内不会引起混淆,混淆减少的过程如图 2 所示,从图 2 可以看出微扫描使得频谱分量减少,从而减少频谱重叠的区域,达到减少混淆的目的[7]。



(a) 欠采样造成的频谱重叠

(a) Spectrum aliasing due to under sampling



(b) 由于微扫描移除了频谱的奇数项

(b) Odd spectrums are removed due to micro-scanning

图 2 微扫描减少混淆效应示意图

Fig.2 Schematic of aliasing effect reduction by micro-scanning

2 基于结构相似度的图像评价指标

为了更直观地体现出微扫描过程对图像的改善程度,从图像质量评价的角度分析,引进基于图像结构相似度(SSIM)的性能评价指标[8]。自然图像信号具有高度的结构性,图像信号各像素之间具有高度的相关性,这种相关性携带了视觉场景中物体的重要的结构信息。图像结构相似度算法的主要思想是:HVS 非常适用于从视觉场景中提取结构信息,因此对结构相似性的测量(或者失真)能够提供近似的感知图像质量。

SSIM 算法认为图像中包含亮度、对比度、结构度三方面的信息,假设 x,y 分别是原始图像信号和失真图像信号,则可以得到图像亮度对比度函数、对比度比较函数、结构相似性比较函数。

(1) 每个信号(分别取自 x,y 相同位置的图像块)的局部亮度由平均亮度估得出:

$$\mu_x=\bar{x}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i \tag{9}$$

因此图像信号的亮度比较函数定义为:

$$l(x,y)=\frac{2\mu_x\mu_y+C_1}{\mu_x^2+\mu_y^2+C_1} \tag{10}$$

式中:C_1 是为了避免 $\mu_x^2+\mu_v^2$ 接近 0 时出现的不稳定性,通常取 $C_1=(K_1L)^2$;K_1 是远远小于 1 的常数;L 为图像灰度值的动态范围 (对于 8 位灰度图像其值为 255)。

(2) 两幅图像的对比度比较函数

用标准差作为信号对比度的粗略估计值,其无偏估计由下式给出:

$$\sigma_x=\left(\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\mu_x)^2\right)^{1/2} \tag{11}$$

与亮度对比度相似,对比度比较函数表示为:

$$c(x,y)=\frac{2\sigma_x\sigma_y+C_2}{\sigma_x^2+\sigma_y^2+C_2} \tag{12}$$

式中:C_2 是为了避免$\sigma_x^2+\sigma_v^2$ 接近 0 时出现的不稳定性,通常取 $C_2=(K_2L)^2$;K_2 是远远小于 1 的常数。

(3) 两幅图像信号的结构对比度函数

单位向量$(x-\mu_x)/\sigma_x$ 与$(y-\mu_y)/\sigma_y$ 之间的相关性等同于图像信号 x 和 y 之间的相关性。因此结构对比函数定义如下:

$$s(x,y)=\frac{2\sigma_{xy}+C_3}{\sigma_x\sigma_y+C_3} \tag{13}$$

式中:σ_{xy} 是两个图像信号的相关系数。在离散数据处理过程中,σ_{xy} 被估计为:

$$\sigma_{xy}=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\mu_x)(y_i-\mu_y) \tag{14}$$

由公式(10)、(12)、(13)得到整体图像的 SSIM 指标为：

$$S(x,y)=[l(x,y)]^{\alpha}\cdot[c(x,y)]^{\beta}\cdot[s(x,y)]^{\gamma} \tag{15}$$

为了便于计算 SSIM 的值，设定 $\alpha=\beta=\gamma=1$，$C_3=C_2/2$，因此简化后的 SSIM 表达式为：

$$\mathrm{SSIM}(x,y)=\frac{(2\mu_x\mu_y+C_1)(2\sigma_{xy}+C_2)}{(\mu_x^2+\mu_y^2+C_1)(\sigma_x^2+\sigma_y^2+C_2)} \tag{16}$$

为了得到鲁棒性的图像质量评价结果，一般取 $K_1=0.01$，$K_2=0.03$。

3 基于 2×2 微扫描方式的模拟仿真

根据微扫描成像原理以及 2×2 微扫描成像的方式，分别针对填充因子为 25%、50%、100%的探测器阵列，仿真了微扫描的成像效果图，从而进一步的验证微扫描对成像的改进情况，根据得到的仿真图像研究填充因子对图像质量的改善程度。将一幅 512×512 像素大小的辐射条纹图像作为原始目标图像，如图 3(a)所示；针对填充因子为 100%的探测器阵列，以 4×4 大小的光敏尺寸对原始图像进行平均采样，再根据 2×2 微扫描的方式获得四幅 128×128 的低分辨率采样图像，将四幅低分辨率图像按照公式(17) 的重建算法得到 256×256 大小的微扫描恢复图像[9-10]；再将微扫描重建后的图像采用双线性插值的方法放大到 512×512 大小，得到图 3(b)所示的图像；图 3(c)是采样后未经过微扫描重建，双线性插值放大的图像。

$$\begin{cases} C(2i-1,2j-1)=I_1(i,j) \\ C(2i-1,2j)=I_2(i,j) \\ C(2i,2j)=I_3(i,j) \\ C(2i,2j-1)=I_4(i,j) \end{cases} \tag{17}$$

式中：C 是微扫描重建后的图像；I_1、I_2、I_3、I_4 是按照 2×2 微扫描方式的得到的四幅低分辨率图像。

针对填充因子为 50%的探测器阵列，水平方向以 4 像素的探测器间隔，4×4 大小的光敏尺寸对图像进行平均采样作为扫描图像的一个像素值，同上述填充因子为 100%的微扫描仿真方式相同进行仿真，仿真效果如图 3(d)、3(e)所示，3(d)是微扫描重建的图像，3(e)是双线性插值重建后的图像。

针对填充因子为 25%的探测器阵列，以 4×4 的探测器间隔像素尺寸，4×4 大小的光敏尺寸对图像进行平均采样作为扫描图像的一个像素值，同上述填充因子为 100%的微扫描仿真方式相同进行仿真，仿真效果如图 3(f)、3(g)所示，3(f)是微扫描重建的图像，3(g)是双线性插值重建后的图像。

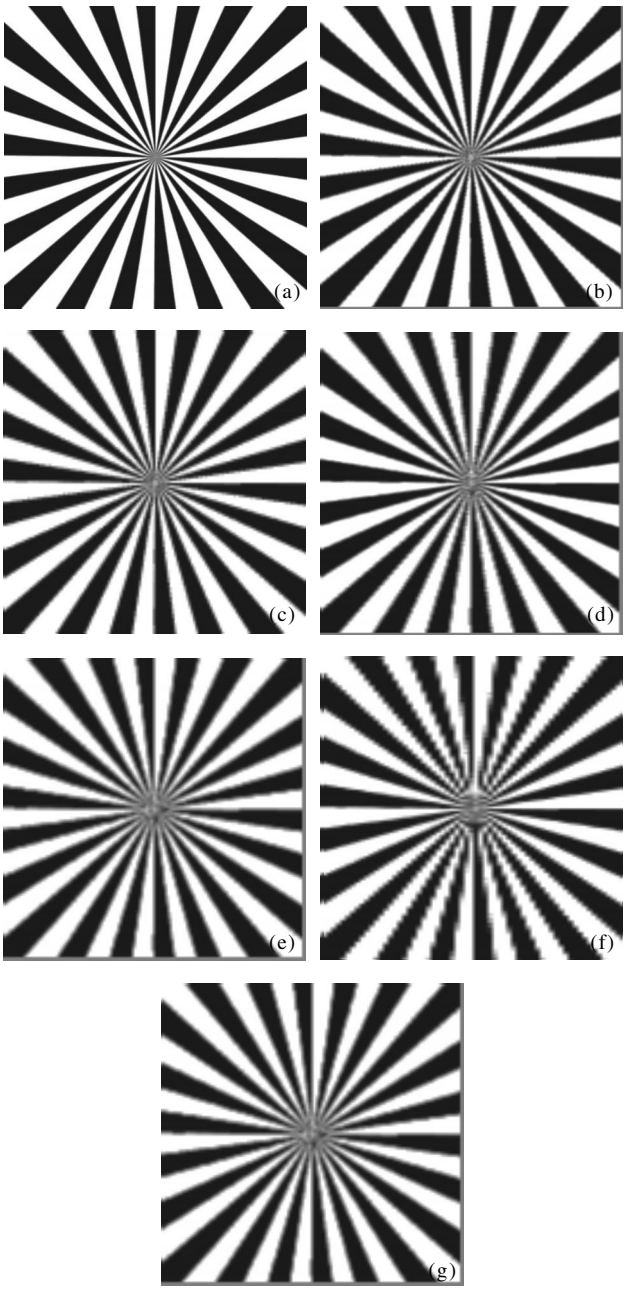


图 3 填充因子为(100%、50%、25%)对应的微扫描和双线性插值仿真结果

Fig.3 Micro-scanning and bilinear interpolation simulation corresponding fill factors (100%, 50%, 25%)

从仿真效果图 3(d)、3(e)、3(g)观察到辐射条纹

边缘出现锯齿条纹的降质现象，而辐射条纹非边缘部分影响不大，这是由于欠采样造成的混淆效应在图像的高频区域表现的较为严重，而在低频部分影响相对较小,同时随着填充因子的不断减小,混淆效应表现的越来越严重；而采用微扫描技术的仿真图像辐射条纹的边缘也出现了锯齿现象，但相比较双线性插值放大的图像而言，锯齿现象得到了很大的消弱，因此微扫描技术能够很好的消除欠采样所造成的混淆效应，从直观上可以看出填充因子的增大能够提高图像的质量，但是填充因子从 25%提高到 100%对于图像的改善不是很明显。

表 1 完整的描述了不同大小的填充因子在 2×2 微扫描工作模式下的重建图像与双线性插值重建图像的峰值信噪比(PSNR)、SSIM、信息熵(H)值,图像的信息熵是衡量图像信息丰富程度的指标，通过对图像信息熵的比较可以对比出图像的细节表现能力,信息熵的大小反映了图像携带信息量的多少,重构图像的信息熵越大，说明重构图像携带的信息量越大,图像质量越高。图像信息熵的表达式为：

$$H=-\sum_{i=0}^{255}\sum_{j=0}^{255}p_{ij}\log p_{ij} \tag{18}$$

$$p_{ij}=f(i,j)/(M\times N) \tag{19}$$

其中 $f(i,j)$表示图像在(i,j)点的像素值,$M\times N$ 表示图像的大小。

表 1 不同填充因子下微扫描和双线性插值算法的 PSNR,SSIM,H和比较

Tab.1 Comparison of PSNR,SSIM and H between micro -scanning and bilinear interpolation under different fill factor

	PSNR		SSIM		H	
Fill factor	Micro-scanning	Double line	Micro-scanning	Double line	Micro-scanning	Double line
0.25	14.867 6	8.681 8	0.921 2	0.667 2	0.856 0	0.763 0
0.5	15.839 0	10.157 1	0.939 1	0.770 4	0.892 7	0.832 1
1	17.348 1	14.554 5	0.958 6	0.919 4	0.933 1	0.891 7

为了对表 1 中的数据有一个直观形象的比较，得到 PSNR、SSIM、H 的分布图,如图 4(a)、4(b)、4(c)所示。

从 PSNR、SSIM、H 的分布图可以看出，微扫描技术对欠采样图像的像质有很大的改善；从前文的

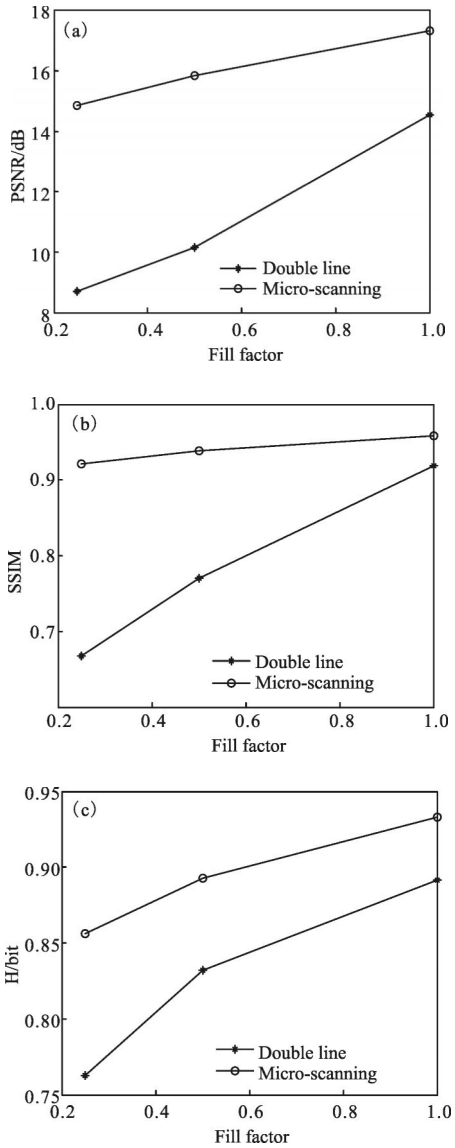


图 4 填充因子与 PSNR、SSIM、H 关系图

Fig.4 Relationship between fill factor and PSNR,SSIM,H

理论分析,SSIM 更能够凸显出像质的改善程度,因此SSIM指标可以作为微扫描性能的评价标准,根据图 4(b)的SSIM分布图,随着填充因子的不断增大,图像的改善程度近似呈线性分布，但是通过更进一步的观察,当填充因子大小只有 0.25 时,经过微扫描后图像的像质仍然得到了很大的提高，因此当填充因子不断增大时,像质的改善程度是有限的,通过对仿真图像的观察也可以得到相同的结论；即在微扫描红外成像系统中,填充因子的作用不再是影响像质的主要因素，因此微扫描技术能够很好的解决探测器阵列对填充因子足够大的工艺要求。对图4(b)SSIM分布图的观察同样可以看出填充因子对

于不是微扫描红外成像系统来说,有很大的影响,增大填充因子能够极大地消弱混淆，提高图像的成像质量。

4 结 论

文中从频率域分析的角度对微扫描技术能够减少混淆现象作了理论上的说明，分析结果表明微扫描技术能够消除图像频谱的奇数项，从而减少频谱重叠的区域，提高图像质量；以 2×2 微扫描方式为例，仿真了不同填充因子下经过微扫描与经过双线性插值的仿真图像，对于仿真图像的分析可以看出填充因子的增加虽然可以提高微扫描成像的质量，但是这种图像的改善程度是有限的，对图像的改善不明显,并不是消除混淆的主要因素;对于非微扫描成像系统,填充因子对图像的改善是非常明显的,能极大的提高图像的质量;这与采用SSIM的评价指标也是相符的。通过研究填充因子对红外传感器成像质量的影响,有助于红外系统的参数设计,并为其提供参考依据。

参考文献:

[1] Zhang Xiaoling, Meng Qingduan, Zhang Liwen, et al. Modeling and deformation analyzing of InSb focal plane arrays detector under thermal shock[J]. ***Infrared Physics and Technology***, 2014, 42(63): 28-34.

[2] Zhang Yi, Bo Lianfa, Qian Weixian, et al. IRFPA image electronic magnification based on pixel gray correlation[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(2): 207-210. (in Chinese)

[3] Lopez-Matines J L, Kober V I, Karnaukhov V N. Image restoration with a micro scanning system [J]. ***Journal of Communications Technology and Electronics***, 2014, 59(12): 1451-1464.

[4] Zuo Yueping, Zhang Jianqi. Modeling and simulation of microscanning imaging system in several patterns[J]. ***Journal of Infrared and Millimeter Waves***, 2003, 22 (2): 145-148. (in Chinese)

[5] Wang Xiaorui, Hu Fangming, Zhang Jianqi, et al. Research on the FPA imaging character based on microscanning[J]. ***Journal of Xidian University***, 2005, 32 (3): 392-395. (in Chinese)

[6] Zhang Yi, Bai Lianfa, Chen Qian, et al. Performance analysis and computation for spatial resolving capability of IRFPA mico-scan[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2009, 38(2): 221-225. (in Chinese)

[7] Cem Koc. Modeling and experimental testing for future development of night vision electro-optic (NVEO)FLIR92 model[D]. California:Naval Postgraduate School, 1995.

[8] Wang Zhou, Bovik A C. Modern Image Quality Assessment [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2015: 37-48. (in Chinese)

[9] Wang Yifeng, Hou Hui, Feng Xueyan. Development of microscan techniques in infrared focal plane array [J]. ***Infrared Technology***, 2013, 35(12): 751-758. (in Chinese)

[10] Meng Haihong, Zhang Xin. Nonmechnical microscanning in staring sensor [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2004, 12(4): 21-25. (in Chinese)