

# 几种工作模式的微扫描成像系统的理论建模和仿真\*

左月萍 张建奇

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西, 西安, 710071)

**摘要** 在分析微扫描技术成像过程的基础上, 利用象素传递函数 (PTF) 对  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  和  $4 \times 4$  这几种工作模式的微扫描系统进行了成像理论建模和计算机仿真. 最后对仿真结果进行了分析和讨论.

**关键词** 微扫描, 工作模式, PTF, 仿真, 成像系统.

## MODELING AND SIMULATION OF MICROSCANNING IMAGING SYSTEMS IN SEVERAL PATTERNS\*

ZUO Yue-Ping ZHANG Jian-Qi

(Institute of Technology Physics, Xi'an University of Electronic Science & Technology, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** On the basis of the analysis of microscanning imaging, microscanning imaging systems in several patterns such as  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  and  $4 \times 4$  were theoretically modeled and simulated with PTF. Finally, the simulation results were shown and analyzed.

**Key words** Microscanning, pattern, PTF, simulation, imaging system.

### 引言

探测器是整个红外成像系统的核心, 对图像质量起着至关重要的作用. 但是, 由于探测器单元有限尺寸的限制, 使获得的图像模糊不清, 即出现了模糊效应; 而且由于探测器与探测器间隙的存在产生了伪信号, 使系统得到的图像并不能完全再现被观察的场景. 随着红外焦平面器件的出现而引入了一种新技术——微扫描技术. 加拿大国防研究组织开发了一种高性能的微扫描成像系统<sup>[1]</sup>, 这种系统能够完成  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  和  $4 \times 4$  的微扫描成像, 它有效地提高了系统空间分辨率, 减少了伪信号. 英国两家科研机构共同通过实地测试, 用测量的数据结果证明了微扫描技术对于系统的整体性能, 如系统的调制传递函数 MTF、噪声等效温差 NETD、最小可分辨温差 MRTD 等有很大的改善<sup>[2]</sup>, 同时展示了实地测试获得的图像, 表明通过微扫描技术图像的质量大大提高了. 可见, 微扫描技术是一种非常有效的成像技术. 因此, 研究微扫描的工作过程, 并对其进行仿真,

以此来指导进一步的微扫描开发和研制, 具有极其重要的研究意义和生产价值. Edward A. Watson<sup>[3]</sup> 等人初步开展了微扫描仿真的工作, 所采用的仿真方法是从微扫描的成像过程出发, 直接对象素进行处理. 这种方法虽然实现简单, 但是缺乏理论分析基础. MTF 是表征系统性能的重要理论, Kai M. Hock<sup>[4]</sup> 从 MTF 的角度分析微扫描时, 得到的图像质量并未得到改善. 实际上微扫描的基本思想已经决定了它确实能改善图像质量, MTF 不再适合于微扫描的理论分析. 为此, Kai M. Hock 引入了 PTF 的概念, 并进行了详细地分析和讨论. 但是, 他只给出了  $1 \times 1$  工作模式的 PTF 具体形式, 仅适用于横向和纵向尺寸相同的单元探测器. 而对于其它几种工作模式的 PTF 没有进一步分析和讨论. 本文在 Kai M. Hock 分析讨论的基础上, 通过理论分析给出了  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$  这几种工作模式的 PTF 的具体形式, 这些表达式适合于任意尺寸的矩形单元探测器. 同时把分析得到的模型应用到实际仿真工作中. 最后对给出的仿真结果进行了分析和讨论.

\* 国家自然科学基金 (批准号 69877016) 资助项目  
稿件收到日期 2001 - 12 - 12, 修改稿收到日期 2002 - 06 - 24

\* The project supported by The National Natural Science Foundation of China (No. 69877016)  
Received 2001 - 12 - 12, revised 2002 - 06 - 24

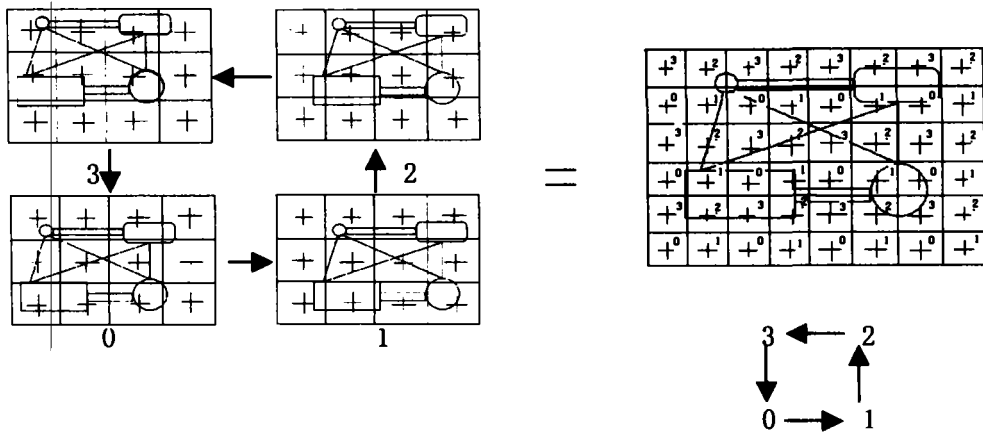


图1 微扫描成像的基本过程,以 $2 \times 2$ 微扫描为例  
 Fig.1 Basic process of microscanning imaging,  $2 \times 2$  as an example

# 1 微扫描成像概述

## 1.1 数据分析

微扫描成像可以看作是一个过采样过程,它是对同一场景进行多次采样成像的.具体地说,微扫描成像就是把焦平面器件对场景每次采样得到的图像存储下来,然后将得到的一系列图像的像素按照获取图像的方式和顺序进行交叉,通过进一步处理得到最终的图像.在整个采样和成像过程中,场景和视场是不移动的,改变的只是焦平面器件的相对位置,而且器件位移的尺寸和采样的次序(路线)与成像模式是一一对应的.以 $2 \times 2$ 微扫描成像过程为例加以说明.如图1所示.

在图中0位置所示是一场场景,焦平面器件对此场景进行成像.如果按照传统模式得到的图像将成为成像结果,但是对于微扫描成像来说,这只是第1次成像,需要把它存储下来;然后保持视场不变,把焦平面阵列向左移动 $1/2$ 的单元探测器与单元探测器间距,得到第2幅图像,如1位置所示;在1的基础上,再把焦平面阵列向下位移 $1/2$ 的探测器间距,

得到2位置的第3幅图像;在2位置的基础上,把焦平面阵列向右位移 $1/2$ 的间距,得到3位置的第4幅图像.至此完成一次微扫描成像过程,然后按照成像次序把得到的这4幅图像的像素进行处理,获得最终的场景图像.为了进行下一次成像,需要把焦平面阵列,回到第一次成像的位置,即0的位置.

从上述过程可以看出:在整个成像过程中,微扫描是对同一场景进行多次采样,而且视场保持不变,焦平面阵列每次位移的尺寸是相同的,都是探测器间距的 $1/2$ ;最后得到的微扫描图像的像素数目是原来的4倍,得到了场景的更多信息,从而大大提高系统对场景细节的分辨能力,即空间分辨率.

## 1.2 微扫描的工作模式

微扫描模式决定了探测器平面上的图像的位移周期,也决定了微扫描的路线.图2是现有的微扫描工作模式.这几种工作模式也分别称为2步、4步、9步和16步扫描.从图2中可以看出:这几种微扫描工作模式不同的是它们的扫描路线不同,而且随着扫描步数的增加,图像的像素数也会增加,从而系统的空间分辨率也会随着提高.

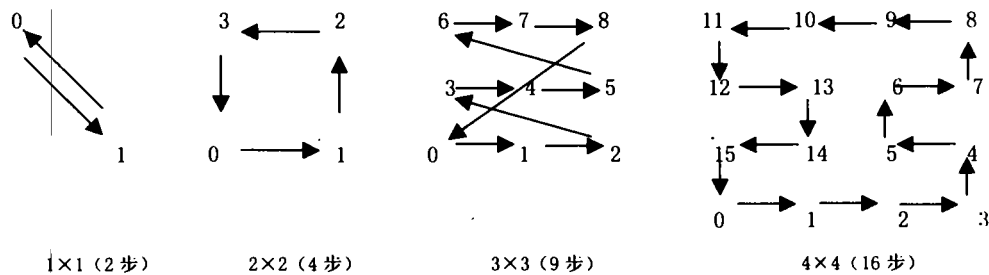


图2 微扫描成像的4种工作模式  
 Fig.2 Four patterns of microscanning imaging

### 2 微扫描成像模型

Kai M. Hock 经过对微扫描系统的 MTF 进行了分析和讨论之后指出<sup>[4]</sup>:由于调制传递函数 MTF 只考虑了探测器的形状和尺寸,没有考虑探测器间的相对位置.而对于相同的探测器形状和尺寸,探测器间的相对位置可能改变,因此对图像会有不同的影响.所以用 MTF 来描述微扫描过程就不再适合.为此,引入了像素传递函数(PTF)的概念.

PTF 同 MTF 一样是在频域内分析信号的,它不仅能描述微扫描过程,而且也能描述一般的采样过程(同 MTF),因此具有一定的普遍适用性. PTF 与 MTF 有紧密的关系,从数学表达式来看,它是 MTF 乘以一个附加因子  $W$ ,不同的微扫描工作模式附加因子就不同,而且随着微扫描步数的增加附加因子  $W$  趋于 1. 即

$$PTF = MTF \cdot W, \tag{1}$$

只考虑探测器单元有效尺寸的影响,而不考虑采样的影响时,这种情况称为理想情况.由于探测器单元有效尺寸的限制,造成不可避免的模糊效应,因此  $PTF = MTF$ ,而  $W = 1$ .在同时考虑探测器和采样给成像带来影响的非理想情况下,会有伪信号产生,此时  $W < 1$ .但是随着微扫描的步数增加,伪信号会逐渐减少, $W \rightarrow 1$ ,从而接近于理想情况.

填充因子为 100% 焦平面阵列的 MTF 实际上是探测器单元形成的矩形函数的傅里叶变换结果,因此对于探测器水平尺寸为  $a$ ,垂直尺寸为  $b$ ,填充因子为 100% 的焦平面阵列成像系统来说,其 MTF 为

$$MTF = \text{sinc}(\pi af_x) \text{sinc}(\pi bf_y). \tag{2}$$

通过分析,可以知道  $W$  的实质是微扫描所形成的微小矩形函数的傅里叶变换的结果,而这个矩形函数是与微扫描工作模式一一对应的.

对于单次采样而言,相当于又经过了探测器的一次滤波,因此  $W$  与 MTF 相同. PTF 就为 MTF 的平方,即

$$PTF = \text{sinc}^2(\pi af_x) \text{sinc}^2(\pi bf_y). \tag{3}$$

对于 2 步扫描来说,可以分析其所形成的新的矩形函数(滤波器).由于 2 步扫描是通过在与水平方向成 45°角的方向位移探测器间距的  $1/\sqrt{2}$  而完成

过扫描过程的.那么形成了一个  $(a/\sqrt{2}) \times (b/\sqrt{2})$  的矩形.因此  $W$  即为该矩形函数的傅里叶变换

$$W = \text{sinc}\left[\pi \frac{af_x + bf_y}{2}\right] \text{sinc}\left[\pi \frac{af_x - bf_y}{2}\right]. \tag{4}$$

对于 4 步微扫描来说,在水平方向和垂直方向分别位移了探测器水平和垂直尺寸的一半,而且在位移过程发生了 45°角的变化,从而形成了一个  $[(a/2)/\sqrt{2} \times (b/2)/\sqrt{2}]$  的矩形.与 2 步微扫描比较,可以看出:式(4)中的  $a$  和  $b$  分别用  $a/2$  和  $b/2$  即可求得 4 步扫描的  $W$ ,如式(5)所示.

$$W = \text{sinc}\left[\pi \frac{af_x + bf_y}{4}\right] \text{sinc}\left[\pi \frac{af_x - bf_y}{4}\right]. \tag{5}$$

同理,对于 9 步、16 步微扫描来说,同样会形成新的过滤器,而且随着微扫描步数的增加,形成的矩形会减小,那么对应的傅里叶变换的结果就会增大;当微扫描步数趋于无穷时,矩形函数就会成为一个冲积函数,它所对应的傅里叶变换为 1,因此成为理想情况.通过分析 9 步和 16 步的微扫描成像过程,可以得到它们所对应的  $W$  如式(6)和式(7)所示.

$$W = \text{sinc}\left[\pi \frac{af_x + bf_y}{6}\right] \text{sinc}\left[\pi \frac{af_x - bf_y}{6}\right], \tag{6}$$

$$W = \text{sinc}\left[\pi \frac{af_x + bf_y}{8}\right] \text{sinc}\left[\pi \frac{af_x - bf_y}{8}\right]. \tag{7}$$

成像系统中探测器对信号的截止频率是由其对应的 MTF 决定的.从以上分析可以看出:单次采样的 MTF 是理想情况下的平方,而对于微扫描成像来说,它的 MTF 是与理想情况相同的.因此,假设单次采样的截止频率为  $f_c$ .那么对于微扫描成像来说,对应的截止频率则为  $2f_c$ .所以相对于单次采样 2 步扫描的图像质量会发生巨大变化;而对不同工作模式的微扫描系统来说,它们的截止频率是相同的,不同的只是  $W$ ,而且  $W$  会随着扫描步数的增加而有微小变化,所以图像质量的提高程度会减小.

这些理论基础对实际的系统设计和计算机仿真具有极其重要的意义.

### 3 仿真结果及分析

在分析微扫描成像过程和建立其成像模型的基础上,利用计算机进行了图像仿真.由于 PTF 是在频域内分析信号的,所以在进行图像仿真之前要对

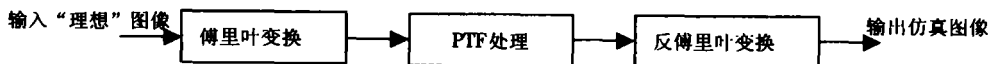


图3 利用 PTF 仿真微扫描成像流程

Fig.3 Flowchart of microscanning imaging simulation with PTF

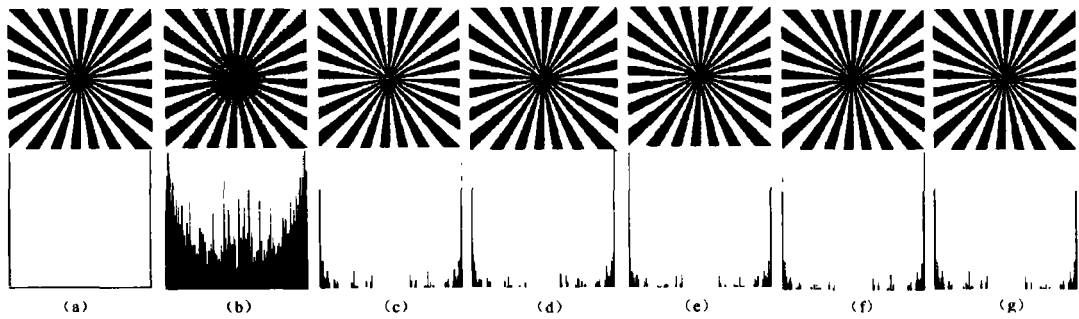


图4 仿真结果

Fig.4 Simulation results

(a) 'ideal' image (b) single sampling (c) 'ideal' case

(d)  $1 \times 1$  microscanning (e)  $2 \times 2$  microscanning (f)  $3 \times 3$  microscanning (g)  $4 \times 4$  microscanning

输入图像进行傅里叶变换,使之成为频域的信号,然后通过PTF处理,将得到的频域结果经过反傅里叶变换后得到空域内的图像,即为得到的仿真图像。仿真流程如图3所示。仿真结果如图4所示。(说明:所谓“理想”图像是指假定该图像没有受到影响图像质量的物理效应的任何影响。)

随着微扫描步数的增加,图像质量提高的程度会减小,以至于肉眼无法分辨。为了给出一个直观的仿真结果,使用直方图来表征图像。辐射状的物体可以更好地显示出仿真结果,所以这里是仿真了一幅辐射状“理想”图像,如图(a)所示。在图4中每个标有(a)等的子图中,上半部分为仿真图像结果,下半部分为该图像的直方图。从图4可以看出:

(1)即使在理想情况下,由于探测器单元有限尺寸的限制,也会使图像模糊。(c)中的图像与(a)中的图像相比变模糊了,在“理想”图中只有两个灰度级,而在(c)中出现了其它级别的灰度;

(2)与微扫描相比,单次采样是图像质量较差的一种成像方式,如(b)所示,它出现了许多级别的灰度值;

(3)由单次采样到2步扫描,图像质量发生了巨大变化,从(b)到(d)可以看出这种变化。

(4)对于不同工作模式的微扫描成像系统来说,随着微扫描步数的增加图像质量将会有所改观,但是提高的程度不大,这可以从图(e)、(f)和(g)中看出。直方图中的“空白地带”(直方图中相距最大的那部分)增加了,与“理想”情况逐渐接近,可是增加的幅度不大。

(5)可以推测:当微扫描步数趋于无穷时,图像质量会接近于理想情况。

(6)微扫描可以有效地提高系统分辨率、改善图像的质量。

#### 4 结语

本文在分析微扫描成像过程的基础上,建立了微扫描成像模型。并对PTF理论进行了拓展和延伸,给出了 $1 \times 1$ 、 $2 \times 2$ 、 $3 \times 3$ 、 $4 \times 4$ 这几种工作模式PTF的数学表达式,这些表达式适合于任意尺寸的矩形单元探测器。最后对计算机仿真结果进行了分析和讨论。从中可以看出:微扫描是一种能够有效提高系统分辨率、改善图像质量的成像方式,随着扫描步数的增加,图像质量会有所改观。它虽然可以有效抑制伪信号,但是,由于探测器本身尺寸的限制,不会减少模糊效应;随着扫描步数的增加,系统的复杂性也随之增加。一般说来,在实际应用中 $1 \times 1$ 的模式成像已是足够。

#### REFERENCES

- [1] Jean Fortin, Paul Chevere. Realization of a fast microscanning device for infrared focal plane arrays. In: *Proc. SPIE*, 1996, **2742**:185—196
- [2] Fred P Blommel, Dr Peter N J Dennis. The effect of microscan operation on staring infrared sensor imagery. In: *Proc. SPIE*. 2000, **1540**:653—664
- [3] Edward A Watson, Robert A Muse, Fred P Blommel. Aliasing and blurring in microscanning imagery. In: *Proc.* 1992, **1689**:242—250
- [4] Kai M Hock. Effect of oversampling in pixel arrays. *Optical Engineering*, 1995, **34**(5):1281—1288