

文章编号: 1002-2082(2006)05-0394-06

微扫描对空间分辨率的影响

彭富伦, 冯卓祥

(西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘要: 在详细分析使用微扫描技术减少混淆效应的基础上, 给出一种利用微扫描技术进行空间分辨率影响分析的像素传递函数(PTF)方法, 并基于 2×2 和 4×4 两种微扫描形式对该函数进行分析计算和讨论。计算结果表明, 在焦平面阵列给定的情况下, 微扫描技术能适当提高焦平面空间的分辨率, 有效减小图像混淆, 明显改善成像质量。指出在没有高空间分辨率成像器件的情况下, 利用微扫描技术和低分辨率成像器件来获得较高空间分辨率的图像是完全可能的。

关键词: 微扫描; 混淆效应; 空间分辨率; 红外焦平面; 热成像; 像素传递函数

中图分类号: TN215; TP802.6

文献标志码: A

Effect of micro-scanning on spatial resolution

PENG Fu-lun, FENG Zhuo-xiang

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The pixel transfer function (PTF) for analyzing micro-scanning technology's effect on spatial resolution is given based on the detailed analyses of the aliasing effect decreased by the micro-scanning technology. The analysis, calculation and discussion on PTF are carried out for two modes of micro-scanning (2×2 , 4×4). The result shows that the micro-scanning technology can increase the focal plane spatial resolution, decrease the image aliasing effectively and improve the imaging quality significantly for FPA thermal imager. It is pointed out that even if high-spatial-resolution imaging device is not available, high spatial resolution images can still be obtained with low-resolution imaging devices by utilizing the micro-scanning technology.

Key words: micro-scanning; aliasing effect; spatial resolution; infrared focal plane; thermal imaging; PTF

引言

景物和背景温度高于绝对 0°C (-273°C) 就产生辐射。该辐射经过大气传输、光学成像、红外探测器转换、电子学处理等环节转变为可见的红外图像, 各个环节都将对成像质量产生影响。红外焦平面阵列由于欠采样, 易引起真假频谱交叠的混淆效应。凝视型红外焦平面热成像系统通常采用固定的二维探测单元阵列, 二维探测单元阵列的尺寸和间距决定了系统的空间采样频率。尼奎斯特

(Nyquist) 采样定理指出, 当被采样场景的空间频率大于系统空间采样频率的一半时, 就会产生折叠混淆效应。由于绝大多数自然场景的热图像都不带限, 因此, 造成欠采样易引起折叠混淆效应。本文重点讨论引起混淆的原因及使用微扫描技术来提高焦平面阵列空间分辨率的方法。

1 混淆的产生

设 $g(x)$ 表示一维连续图像信号, 那么通过梳

状函数的采样为

$$g_s(x) = g(x - x_0) \frac{1}{a} \text{comb}\left(\frac{x}{a}\right) \quad (1)$$

式中, $\text{comb}(x) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \delta(x - l)$; a 为采样周期, x_0 为输入图像与采样格之间的相对位移。将(1)式转化到频域可以得到

$$G_s(u) = G(u) \exp(j2\pi u x_0) * \text{comb}(au) = \frac{1}{a} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} G(u - \frac{k}{a}) \exp[j2\pi(u - \frac{k}{a})x_0] \quad (2)$$

式中乘法相位因子 $\exp(j2\pi u x_0)$ 对采样场景的相位,也就是说,对应输入图像与采样格之间的相对位移;采样过程是通过频域采样场景相位因子的变换对原始图像频谱进行无限的复制,重复周期等于采样频率 $1/a$; k 表示复制的阶数,0阶复制表示原始信号的傅里叶变换。原理上混淆是因为临近的频谱复制之间有重叠现象,高阶混淆是指在基带范围发生的高阶频谱复制。

若已知采样频谱和空间卷积重建滤波器 $r(x)$,则重建图像的傅里叶形式为

$$\bar{G}(u) = G_s(u) R(u) \quad (3)$$

式中 $R(u)$ 是 $r(x)$ 的傅里叶变换。

通常图像重建过程都是在阻止高阶频谱复制的同时尽量使基带频谱通过。当采样频率远小于 Nyquist 频率时发生高阶混淆。为了评估混淆的严重性,定义高阶混淆的因子为 f_c (输入图像的截断频率) 以及采样频率 $f_s = 1/a$, 2者关系如下:

$$\left\{ \begin{array}{ll} f_s \geq 2f_c & \text{没有混淆发生} \\ f_c \leq f_s < 2f_c & \text{一阶混淆} \\ \frac{f_c}{2} \leq f_s < f_c & \text{二阶混淆} \\ \vdots & \\ \frac{f_c}{2^{n-1}} \leq f_s < \frac{f_c}{2^{n-2}} & n \text{ 阶混淆} \end{array} \right. \quad (4)$$

从(4)式可以看出,原始的带限频谱就是采样频谱中的基带,重建滤波器是一个理想的有截止频率的低通函数,截止频率等于频谱的基带频率。K阶混淆就是指K阶的频谱复制落入基带范围内与其他阶频谱复制重叠。

2 使用微扫描减小混淆的原理分析

抽样子系统中物体 $o(x, y)$ 经光学系统后产生的模糊像为 $i(x, y)$, 假设光学子系统是线性系统, $i(x, y) = o(x, y) * h(x, y)$, 其中 $h(x, y)$ 表示系统

的点扩散函数。探测器阵列对连续图像 $i(x, y)$ 抽样产生的抽样图像为 $i_s(x, y)$, 则

$$i_s(x, y) = \left[\frac{1}{w_x w_y} a \left(\frac{x}{w_x}, \frac{y}{w_y} \right) * o(x, y) * h(x, y) \right] \frac{1}{d_x d_y} \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y}\right) \quad (5)$$

式中, $a(x, y)$ 是描述每个探测器单元(像素)形状的函数; w_x 和 w_y 分别为 x 和 y 方向的像素宽度; d_x 和 d_y 分别表示 x 和 y 方向像素之间的间距。公式(4)忽略了探测器阵列有限尺寸的影响。梳状函数定义为

$$\text{comb}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(x - n, y - m) \quad (6)$$

对(6)式进行傅里叶变换,可获得图像的空间频率谱,即

$$I_s(\xi, \eta) = [A(w_x \xi, w_y \eta) O(\xi, \eta) H(\xi, \eta)] * \text{comb}(d_x \xi, d_y \eta) \quad (7)$$

从(7)式可以看出,像素孔径和光学系统会对物体的空间频率内容进行滤波(或模糊)。由于存在梳状函数卷积,因此模糊物体频谱在抽样点处被复制,产生频谱混叠。

考虑 2×2 微扫描情况,即连续图像被微扫描装置在 x 和 y 方向分别移动了像素间距的一半,扫描过程如图1所示^[1]。

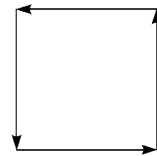


图1 2×2 微扫描

Fig.1 Microsampling model of 2×2 微扫描过程产生的抽样图像为 i_{ms} , 则

$$i_{ms}(x, y) = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{w_x w_y} a \left(\frac{x}{w_x}, \frac{y}{w_y} \right) * o(x, y) * h(x, y) \right] \frac{1}{d_x d_y} \left\{ \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x} - \frac{1}{2}, \frac{y}{d_y}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y} - \frac{1}{2}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x} - \frac{1}{2}, \frac{y}{d_y} - \frac{1}{2}\right) \right\} \quad (8)$$

(8)式中的系数 $1/4$ 表示每帧场像积分时间相对于非微扫描时间的减少,4帧微扫描图像上收集的总能量与单个的、非微扫描图像的总能量相同。对(8)

式进行傅里叶变换,得到

$$I_s(\xi, \eta) = \frac{1}{4} [A(\tau_x \xi, \tau_y \eta) O(\xi, \eta) H(\xi, \eta)]^* \{ \text{comb}(d_x \xi, d_y \eta) \times [1 + e^{i\pi d_x \xi} + e^{-i\pi d_y \eta} + e^{-i\pi(d_x \xi + d_y \eta)}] \} \quad (9)$$

将(6)式带入(9)式,有

$$I_s(\xi, \eta) = \frac{1}{4} [A(\tau_x \xi, \tau_y \eta) O(\xi, \eta) H(\xi, \eta)]^* \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(d_x \xi - n, d_y \eta - m) \times [1 + e^{-i\pi n} + e^{-i\pi m} + e^{-i\pi(m+n)}] \right\} \quad (10)$$

(10)式中,当 n 和 m 为偶数时其值为4,对于 n 和 m 的其它组合则为0。也就是说,只有偶级谱引起混淆。由此可知,2×2微扫描可以减少基带内的频谱混淆,非零级谐波与基带图像频谱的分离较大,等效于提高了1倍的Nyquist频率。

微扫描技术引入到红外凝视成像系统中等效于减小了抽样间距,增加了空间抽样率。这能减小图像中的频谱混淆,提高分辨率。

以上微扫描对空间分辨率等成像性能参数影响的分析是建立在成像光斑小于探测器单元的基础上的。在微扫描实际应用中应该考虑光斑的大小,如图2所示。

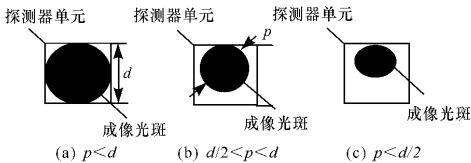


图2 成像光斑与探测器大小的关系

Fig. 2 The relationship between imaging facula and pixel size of detector

图2(a)为使用探测器阵列接收场景图像时光学设计中的成像光斑小于探测器单元尺寸,即 $p < d$ 。当成像系统中使用微扫描方式时,为更好的发挥微扫描的性能,成像光斑的大小就要随之改变,如图2(b)和2(c)所示。其计算公式为

$$d = \frac{1.22f\lambda}{D} \quad (11)$$

式中, d 为衍射限制光斑尺寸; λ 为波长; f 为焦距; D 为入瞳直径。

由 $F = f/D$ 得: $d = 1.22\lambda F$ 。

从以上分析可以看出,到达焦平面上成像光斑的尺寸与系统的 F 数成正比,与波长成正比。当透射窗口选定后,波长就确定了,尺寸只与 F 数有关。

为了避免衍射光斑对成像质量产生影响,衍射光斑的大小必须小于探测器单元大小。使用微扫描提高空间分辨率时光斑大小需要与微扫描模式匹配,才能发挥微扫描的最优性能。如法国FC热像仪的 F 数为3,不采用点头微扫描方式;GP热像仪的 F 数为1.7,采用点头微扫描方式。

3 使用像素传递函数(PTF)分析微扫描对空间分辨率的影响

假设红外探测器(FPA)的像元尺寸为 $a \times a$,像元中心间距为 b , $i(x)$ 为照射到FPA上的信号强度分布。我们知道,在积分采样过程中落到每个像元上的强度是由 $i(x)$ 在区间间隔内的积分获得的。每一个FPA像元获得的信号强度用 $i_n(x)$ 表示,即

$$i_n(x) = \int_{x-a/2}^{x+a/2} i(x) dx \quad (12)$$

上式也可表示成

$$i_n(x) = i(x) * \text{rect}(x/a) \quad (13)$$

根据卷积定理,公式(13)等效于在空间频率范围内用传递函数进行滤波^[12],则

$$\text{MTF}_{\text{footprint}}(\xi) = |\text{sinc}(\xi a)| = \left| \frac{\sin(\pi \xi a)}{\pi \xi a} \right| \quad (14)$$

式中 $\text{MTF}_{\text{footprint}}$ 为探测器单元覆盖区的传递函数,它表示探测器单元的形状和尺寸对信号的影响。由公式(14)可以看出,探测器单元尺寸越小,传递函数越宽。图3给出了这个传递函数的曲线,其中横轴为归一化空间频率,并使 $\xi = 1/a = 1$;纵轴为传递函数数值。从图3可以看出, $\xi = 1/a$ 处MTF出现第1个零值。

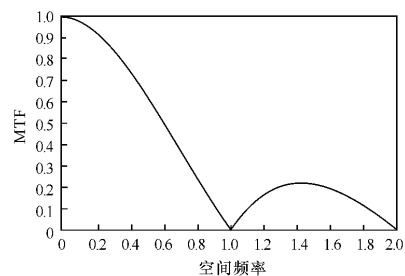


图3 探测器光敏区传递函数

Fig. 3 The MTF of photosensitive area

经过FPA阵列离散抽样后,将(13)式乘以理想抽样函数,则输出的信号强度为

$$i_s(x) = [i(x) * \text{rect}(x/a)] \sum_{i=-n}^n \delta(x - ib) \quad (15)$$

考虑图 4 结构的稀疏探测器阵列,用给定尺寸为 a 的方形探测器接收信号强度,则抽样值为落到探测器单元上的强度平均值。

对于给定尺寸的离散探测器阵列,采样得到的上限空间频率是一定的,如图 4 所示。图 4 中虚线为探测器单元上接收到的信号平均值。

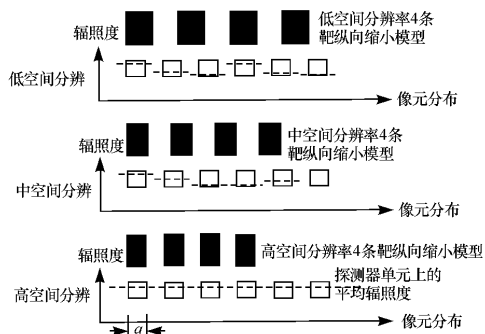


图 4 探测器对标准 4 条靶采样示意图

Fig. 4 The detector sampling figure of four block targets

从图 4 可以看出,低空间分辨率的 4 条靶在探测器单元上能形成很好的信号调制度和对比度,随着 4 条靶空间分辨率的增加,探测器有限尺寸的影响就变的十分明显了。当空间频率达到探测器极限频率时,无论靶元的对比度为多高,在探测器单元上都不能形成有效的强度对比,且不能被分辨。从图 4 可以看出,探测器单元的尺寸、间距和输入信号的空间频率以及峰值落在探测器单元上的位置将直接影响输出信号的调制度。

为方便讨论输入信号与像元之间位相的关系,假设 $i(x)$ 取如下形式

$$i(x) = 1 + A \cos(2\pi f x + \varphi) \quad (16)$$

式中, f 为输入信号的空间频率; φ 表示 4 条靶上每条靶带与像元中心的偏离。当 φ 分别为 $0, \pi/4, \pi/3, \pi/2$ 时,利用(15)式对同一空间分辨率在探测器极限空间频率以内的 4 条靶进行模拟仿真,得到 FPA 像元的输出结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,输入信号与 FPA 像元之间的位相 φ 对输出调制度有很大影响,这直接影响整个 FPA 阵列的 MTF。

根据 J. Feltz 的假设^[3],分析 FPA 对输出的响应时,定义 MTF 为

$$MTF = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} \quad (17)$$

其中 B_{\max} 和 B_{\min} 分别对应离散序列中的峰、谷值。因此,MTF 与 f 和 φ 都有关,这不利于分析。

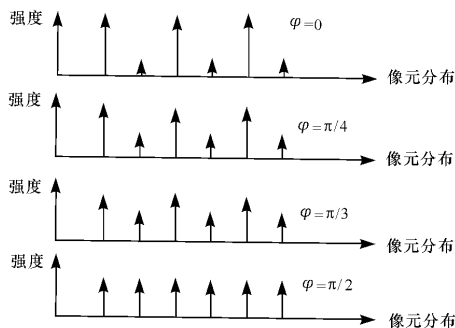


图 5 位相不同时的像元输出结果

Fig. 5 The pixel output of different phases

在一维情况下,考虑单个像素对强度轮廓 $i(x)$ 进行连续扫描,也就是说,它有一个无限的抽样率。假设像素大小为 $p \times p$,则抽样图像的结果为

$$i'_{\text{conv}}(x) = \frac{i(x) * \text{rect}(x/p)}{p} \quad (18)$$

根据方程式(18)的傅里叶变换可以直接导出公式(14)中的滤波函数,它是一个 sinc 函数,是一种理想的情况。下面分析包含了像素阵列的离散特性。

假设有一个特定空间频率为 f_0 的输入信号,可以表示成

$$i(x) = A_0 + A_1 \cos(2\pi f_0 x) \quad (19)$$

式中, A_0 是平均强度; A_1 是调制幅度。 $i(x)$ 的对比度在与像素卷积后有所减小。新的调制幅度可通过在像素范围内调制 $A_1 \cos(2\pi f_0 x)$ 的平均获得。假定像素的大小为 p ,像素中心间距也为 p 。当像素的中心位于余弦曲线峰的时候,等效于余弦曲线在 $x = -p/2 \sim p/2$ 的范围内取平均值。设新的调制幅度为 A_2 ,由于原始余弦曲线在原点的任何一边都减小了,因此这个平均值将小于峰值,也将小于 A_1 (参见图 4)。 A_2/A_1 的比值很容易由下式得到:

$$A_2 = \frac{1}{p} \int_{-p/2}^{p/2} A_1 \cos(2\pi f_0 x) dx = A_1 \frac{\sin(\pi f_0 p)}{\pi f_0 p} \quad (20)$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \text{sinc}(f_0/f_p) \quad (21)$$

式中 $f_p = 1/p$ 。上式得到的结果是一个 sinc 函数。然而原始的 $A_1 \cos(2\pi f_0 x)$ 的峰值不一定位于像素的中心,实际像素位于离散的空间位置上,且不

是连续的扫描图像。如果它偏离中心,由前面的分析可知,新的调制度 A_2 将有不同的值,其值依赖于它偏离中心的距离。因此,需要定义一个 A_2 的期望值 $E(A_2)$ 来对它进行描述。首先需要理解峰值关于像素位置的概率分布,做一个合理的假设。假设峰值等落在像素的任意位置上,就是说,有一个均匀概率分布。如果峰值偏离中心的距离为 x ,且 x' 位于 $-p/2 \sim p/2$ 之间的任意位置,则公式(20)中的积分限变化到 $(x' - p/2) \sim (x' + p/2)$ 。由于 A_2 是 x' 的函数,所以它在 $(x' - p/2) \sim (x' + p/2)$ 范围内的平均数为

$$E(A_2) = \frac{1}{p} \int_{-p/2}^{p/2} A_2 dx' = \frac{1}{p} \int_{-p/2}^{p/2} \left(\frac{1}{p} \int_{-p/2+x'}^{p/2+x'} A_1 \cos(2\pi f_0 x) dx \right) dx' \quad (22)$$

新的传递函数被定义为新的调制度与原调制度的比值,即

$$\frac{E(A_2)}{A_1} = \text{sinc}^2\left(\frac{f_0}{f_p}\right) \quad (23)$$

与公式(21)相比,公式(23)的结果更合理。由于像素之间的信息被阵列漏掉了,因此一个离散像素阵列抽样的结果比连续扫描像素的结果要差。新的传递函数被称作像素传递函数,即 PTF。

为了将此概念应用于过抽样,假设像素大小为 d ,像素中心间距为 p 。对于像素阵列来说,一般情况下 $d \leq p$ 。对于 PTF 的表达式,首先应获得关于 d 的项,因此公式(21)被调整为

$$E(A_2) = \frac{1}{p} \int_{-p/2}^{p/2} A_2 dx' = \frac{1}{p} \int_{-p/2}^{p/2} \left(\frac{1}{d} \int_{-p/2-x'}^{p/2+x'} A_1 \cos(2\pi f_0 x) dx \right) dx' \quad (24)$$

$$\frac{E(A_2)}{A_1} = \text{sinc}\left(\frac{f_0}{f_p}\right) \text{sinc}\left(\frac{f_0}{f_d}\right) \quad (25)$$

式中, $f_p = 1/\text{像素间距}$; $f_d = 1/\text{像素尺寸}$ 。微扫描过程可以看作是过抽样过程,因此,对于像素间距为 p 的一维像素阵列 2×2 过抽样 PTF,可由公式(25)求得:

$$\text{PTF} = \text{sinc}(f_0/2f_p) \text{sinc}(f_0/f_p) \quad (26)$$

根据上述关于像素传递函数的定义,当像素尺寸为 d ,像素中心距为 p 时,可以得到连续扫描。单帧抽样和 2×2 ; 4×4 微扫描过抽样过程中的像素传递函数为

$$\text{PTF}_{\text{连续}} = \text{sinc}(fp)$$

$$\text{PTF}_{\text{单幅抽样}} = \text{sinc}^2(fp)$$

$$\text{PTF}_{\text{过抽样}_1} = \text{sinc}(fp) + \text{sinc}(fp/2) \quad (27)$$

$$\text{PTF}_{\text{过抽样}_2} = \text{sinc}(fp) + \text{sinc}(fp/4)$$

图 6 描述了连续扫描、单帧抽样及过抽样情况下的像素传递函数曲线。连续扫描是一种理想情况,有无限的抽样率,正如公式(18)讨论那样,它是实践中可能达到的上限。单帧抽样是一种较差的情况,因为像素之间的很多细节被留在外面。过抽样弥补了在每个相邻成对像素之间额外的抽样信息,从图 6 中虚线可以看出,它的性能接近于理想情况。因此,这个 PTF 能够提供对像素阵列实际性能的直接测量,并且它同样适用于连续扫描的情况。

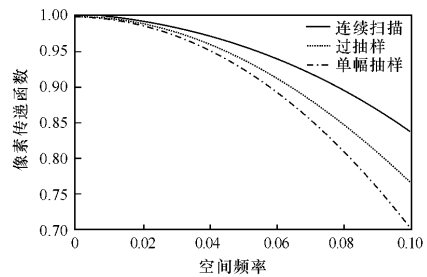


图 6 不同情况的像素传递函数曲线

Fig. 6 The curves of the different PTFs

由以上分析可以得出这样的结论,微扫描是以牺牲每幅图像的积分时间为代价,微扫描合成后的一帧图像与不使用微扫描的一帧图像的积分时间相同。那么在各自的极限空间频率处具有相同的像素传递函数值,即

$$\text{PTF}_{\text{单}}(f_{\text{max}1}) = \text{PTF}_{\text{微}}(f_{\text{max}2}) \quad (28)$$

对于 2×2 微扫描,有

$$\text{sinc}^2(f_{\text{max}1}p) = \text{sinc}(f_{\text{max}2}p) \text{sinc}(f_{\text{max}2}p/2) \quad (29)$$

式中 $f_{\text{max}1}$ 及 p 由焦平面自身给出,进而可得出相应的 $f_{\text{max}2}$ 。通过比较 $f_{\text{max}2}$ 与 $f_{\text{max}1}$ 就可以得出微扫描对空间分辨率的影响。

假设微扫描使用 320×240 长波红外阵列,像素间距 $p = 45 \mu\text{m}$,理想填充率为 100%,即 $d = p$ 。

那么 $f_{\text{max}1} = \frac{1}{2p}$,代入(29)式得

$$2(f_{\text{max}2}p)^2 = \sin(\pi f_{\text{max}2}p) \sin(\pi f_{\text{max}2}p/2) \quad (30)$$

令 $t = f_{\text{max}2}p$,方程(30)变为

$$2t^2 = \sin(\pi t) \sin(\pi t/2) \quad (31)$$

使用代数方法求解方程(31)比较困难,本文

采用图解法。用 Matlab 在同一幅图上分别画出 $y = 2t^2$ 及 $y = \sin(\pi t)\sin(\pi t/2)$ 的曲线,找出 2 曲线的交点,如图 7 所示。

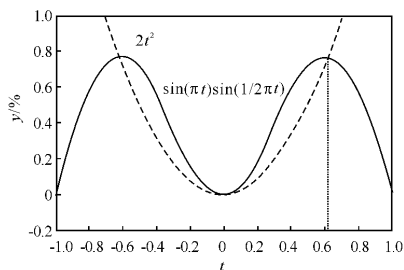


图 7 图解局部放大图

Fig. 7 The zooming figure of illustration

从图 7 可以看出,2 条曲线有 2 个交点分别为 $t_1 = -0.62$ 和 $t_2 = 0.62$,实际中不可能为负,所以 2 条曲线相等的点在 $t = 0.62$ 处。即

$$t = f_{\max 2} p = 0.62$$

$$f_{\max 2} = 0.62/p$$

与不使用微扫描的极限空间频率相比,可以得出

$$\eta_{2 \times 2} = \frac{f_{\max 2} - f_{\max 1}}{f_{\max 1}} = \frac{0.62 - 0.5}{0.5} = 24\% \quad (32)$$

同理, 4×4 微扫描方式对空间频率的改善情况为 $\eta_{4 \times 4} = 32\%$ 。实际情况与理想情况有差别,实际中 $p \neq d$,那么,对 2×2 的微扫描可以得出

$$\sin c^2(f_{\max 1} p) = \sin c(f_{\max 2} d) \sin c(f_{\max 2} p/2) \quad (33)$$

这里填充率为 80%, $d = 0.8p$,代入上式得

$$1.6(f_{\max 2} p)^2 = \sin(0.8\pi f_{\max 2} p) \times \sin(\pi f_{\max 2} p/2) \quad (34)$$

同理,令 $t = f_{\max 2} p$,方程(34)变为

$$1.6t^2 = \sin(0.8\pi t) \sin(\pi t/2) \quad (35)$$

用与理想情况求解相同的方法,可得

$$\eta_{2 \times 2} = \frac{f_{\max 2} - f_{\max 1}}{f_{\max 1}} = \frac{0.74 - 0.5}{0.5} = 48\% \quad (36)$$

$$\eta_{4 \times 4} = 64\%$$

比较理想情况与实际情况可以看出,微扫描对

占空比大的焦平面阵列的空间分辨率的改善不如占空比小的焦平面阵列明显,对像元尺寸小的空间分辨率的改善不如像元尺寸大的焦平面阵列明显。

法国 SAGEM 公司生产的 MATIS 系列第三代热像仪中的便携式和标准型热像仪采用 320×240 InSb 探测器,填充因子大于 90%,采用 2×2 微扫描。识别距离指标表明:不带微扫描时识别距离为 4 km,有微扫描时为 5 km。由此可见,采用微扫描识别距离提高了 25%,计算结果与此相符。

4 结 论

在焦平面阵列给定情况下,微扫描能适当提高焦平面空间分辨率,减小图像混淆,改善成像质量。微扫描步数越多,对空间分辨率的改善情况越好。但微扫描驱动控制也越来越复杂,并且增加扫描步数与提高空间分辨率不成正比。也就是说,扫描步数增加到一定程度以后,对空间分辨率的提高就不明显了。因此,在实际使用中不可能无限地增加微扫描步数(与焦平面器件自身特性有关),需要全面均衡扫描步数与成像质量之间的得失,得出合理的微扫描模式。

参考文献:

- [1] FORTIN J, CHEVRETTE P. Realization of a fast microscanning device for infrared focal plane arrays [J]. SPIE, 1996, 2743: 185-196.
- [2] BLOMMEL F P, DENNIS Dr Peter N J, BRADLEY Dr D. Effects of microscan operation on staring infrared sensor imagery [J]. SPIE, 1991, 1540: 653-664.
- [3] CHEN Zi-kuan, KARIM M A. Effect of band-pass sampling on joint transform correlation [J]. Optical Engineer, 1999, 38(5): 886-890.
- [4] 关英姿, 韩四宁. CCD 相机调制传递函数测试软件的研制 [J]. 应用光学, 2004, 25(6): 54-56.
GUAN Ying-zi, HAN Si-ning. Development of a test software for the modulated transfer function of CCD camera [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(6): 54-56. (in Chinese)