

微扫描型非制冷红外探测器像元曝光顺序计算

郝东亮^{1,2}, 鱼卫星¹, 王泰升¹, 卢振武¹, 孙强¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 微扫描技术能提高红外系统的分辨率, 这使得对微扫描器的研究意义非凡。针对非制冷红外焦平面探测器, 在已知微扫描器的叶片形状参数以及微扫描器与焦平面阵列的相对位置的前提下, 结合具体个例, 计算了焦平面阵列上各个像元的曝光顺序, 为后续读出电路的读出顺序的选择和进一步的数字图像处理提供了依据。

关键词: 微扫描; 焦平面阵列; 曝光顺序; 读出顺序

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)05-0265-05

Calculation of the Exposure Sequence of Microscan Uncooled Infrared Focal Plane Array

HAO Dong-liang^{1,2}, YU Wei-xing¹, WANG Tai-sheng¹, LU Zhen-wu¹, SUN Qiang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Microscanning is a promising technology being able to improve the resolution of the infrared imaging system, which has been extensively studied and a lot of efforts have been made to develop micro-scanners. In this paper, a method of calculating the exposure sequence of the infrared focal plane array is proposed. The method is derived based on a practical microscanner reported earlier from which the geometrical parameters of the microscanner and the relative position between the microscanner and the focal plane array were already known. By employing our method, it is convenient to calculate the exposure sequence of focal plane array and will be helpful for reading out signal by the read-out circuit.

Key words: microscanning, FPA, exposure sequence, readout sequence

0 引言

红外焦平面阵列成像过程就是用焦平面阵列对连续信号的采样过程。根据采样定理, 要真实地还原场景, 采样频率就要达到自然场景奈奎斯特频率的 2 倍^[1]。对焦平面阵列而言, 采样频率越高就要求焦平面阵列像元越小, 越密集。而实际上, 一方面受加工工艺的限制, 制作高密度焦平面阵列的成本高; 另一方面, 像元过小会降低像元的信号强度, 降低探测器的信噪比。这些因素使单纯通过减小像元大小来提高红外探测器分辨率的途径受到了一定的限制。而微扫描技术的出现, 为探测器分辨率的提高提供了一种新的途径。微扫描技术就是利用微扫描装置将光学系统获得的图像在 X 、 Y 方向分别进行 $1/N$ (N 为正整

数) 像素间距的位移, 得到 $N \times N$ 帧欠抽样图像, 并运用数字图像处理方法将多帧经过亚像素位移的图像重建成一帧图像, 从而实现分辨率提高的技术^[2]。

微扫描技术的引入, 会影响焦平面阵列上像元的曝光顺序, 影响程度取决于微扫描器的形状。对于阿基米德螺旋线形的微扫描器, 需要选择合适的参数, 而且文献[2]中已给出了相关参数的计算方法。然而, 微扫描器的引入对焦平面阵列上像元的曝光顺序的影响到底有多大, 如何计算各个像元的曝光顺序, 目前没有发现有这方面的报道。而曝光顺序不同导致了像元间曝光非均匀性, 影响了成像的真实性。因此曝光顺序的计算可以为信号读取顺序的选择以及后续的数字图像处理提供依据, 具有一定的现实意义。

1 微扫描技术的理论基础

红外焦平面阵列热成像系统的成像原理如图1所示。

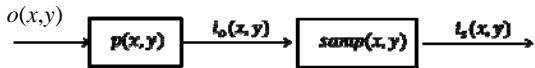


图1 红外焦平面阵列成像模型

Fig.1 Imaging model for infrared FPA

物函数用 $o(x,y)$ 表示, 红外系统的传递函数用 $p(x,y)$ 表示, 焦平面阵列的采样函数用 $\text{samp}(x,y)$ 表示, 则抽样函数可以表示为^[2]:

$$i_s(x,y) = o(x,y) \otimes p(x,y) \times \text{samp}(x,y) \quad (1)$$

其频谱函数为:

$$I_s(\zeta, \eta) = [O(\zeta, \eta) \times P(\zeta, \eta)] \otimes \text{SAMP}(\zeta, \eta) \quad (2)$$

式中: 各大写字母表示对应小写字母表示的函数的傅里叶变换, 符号 \otimes 表示卷积运算。

对于二维焦平面阵列:

$$\text{samp}(x, y) = \frac{1}{d_x d_y} \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y}\right) \quad (3)$$

式中:

$$\text{comb}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x-n, y-m) \quad (4)$$

则:

$$i_s(x, y) = [o(x, y) \otimes p(x, y)] \times \frac{1}{d_x d_y} \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y}\right) \quad (5)$$

$$I_s(\zeta, \eta) = [O(\zeta, \eta) \times P(\zeta, \eta)] \otimes \text{comb}(d_x \zeta, d_y \eta) \quad (6)$$

梳状函数是周期函数, 做卷积运算会造成频谱在 ζ 、 η 方向周期排列。像素单元积分和光学系统会减小像谱宽度, 使高频衰减。若已减少的像谱宽度大于抽样频率, 则高级频谱与零级谱将产生混淆^[3]。

以 2×2 步微扫描为例, 分析微扫描对分辨率的影响。若用 i_{ms} 表示抽样函数, 则:

$$i_{\text{ms}}(x, y) = \frac{1}{4} [o(x, y) \otimes p(x, y)] \times \frac{1}{d_x d_y} \times \{ \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x} - \frac{1}{2}, \frac{y}{d_y}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y} - \frac{1}{2}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x} - \frac{1}{2}, \frac{y}{d_y} - \frac{1}{2}\right) \} \quad (7)$$

$1/4$ 的产生是因为理论上积分时间变为原来的 $1/4$, 信号强度对应减小。做傅里叶变化后得到频谱函数 $I_{\text{ms}}(\zeta, \eta)$:

$$\begin{aligned} I_{\text{ms}}(\zeta, \eta) &= \frac{1}{4} [O(\zeta, \eta) P(\zeta, \eta)] \otimes \\ &\text{comb}(d_x \zeta, d_y \eta) \times [1 + e^{-i\pi d_x \zeta} + e^{-i\pi d_y \eta} + e^{-i\pi(d_x \zeta + d_y \eta)}] \} \\ &= \frac{1}{4} [O(\zeta, \eta) P(\zeta, \eta)] \otimes \\ &\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(d_x \zeta - n, d_y \eta - m) \times \\ &[1 + e^{-i\pi n} + e^{-i\pi m} + e^{-i\pi(m+n)}] \} \end{aligned} \quad (8)$$

可见, 当 n 和 m 均为偶数时其值不为 0, 只有这种情况才产生频谱混淆, 这说明微扫描可以提高分辨率^[4]。

同理分析 $N \times N$ 步微扫描对分辨率的影响后发现, 微扫描步数越多, 消除频谱混淆的效果越明显。但是微扫描步数越多, 对机械结构要求越严格, 系统会越来越复杂^[5], 所以一般采用 2×2 步微扫描。

2 微扫描方案和螺旋线参数

现有的微扫描器实现方式主要分为机械平移法、摆镜法、平板旋转法^[6]。机械平移法有透镜平移和探测器平移两种, 但都是通过机械方法使光学系统与探测器之间形成可控的位移, 实现微扫描。这种系统的压电驱动电路较复杂, 光学设计受到微位移机构的限制, 通用性差。摆镜法在光路中放置反射摆镜, 实现一个或两个正交方向的微扫描。这种方法在小型化和高精度器件的设计和制作中受阻。平板旋转法是在探测器和光学物镜之间加入倾斜的平板, 平板使光线产生微小平移, 进而实现微扫描。这种微扫描方式结构简单、控制方便、容易和不同系统配合使用, 可以设计成通用部件, 研究较多。昆明物理研究所提出了阿基米德螺旋线形状的平板光学元件微扫描方式^[7]。它的结构如图 2 所示。这种微扫描器有 6 片阿基米德螺旋线形状的镜片, 其中 4 片透光, 如图 2 中的着色部分, 每一片都能使光线沿着设定方向产生微小位移; 另外 2 片不透光, 用来形成调制信号。

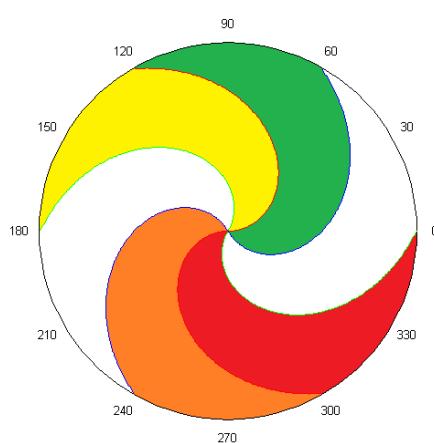


图2 阿基米德螺旋线形平板微扫描器

Fig.2 Micro-scanner with Archimedes spiral shaped blades

上述微扫描器选择阿基米德螺旋线形状, 是为了实现对焦平面阵列像元的均匀“推扫”, 方便信号处理, 还原真实场景。阿基米德螺旋线就是一动点沿着径向匀速运动的同时以固定角速度旋转产生的轨迹。若分别用 v 、 w 表示动点径向速度和旋转角速度, t 表示运动时间, (r, θ) 表示动点的极坐标, 则:

$$\begin{cases} r = v \times t \\ \theta = w \times t \end{cases} \quad (9)$$

令比例系数:

$$\chi = v/w \quad (10)$$

则:

$$r = \chi \theta \quad (11)$$

由式(11)可知, 动点的半径与极角正比。 χ 的值决定了阿基米德螺旋线的形状。而阿基米德螺旋线的曲率 K 为:

$$K = (2 + \theta^2) / [\chi(1 + \theta^2)^{3/2}] \quad (12)$$

可见, 曲率 K 与比例系数 χ 和极角 θ 有关。

为得到较好的“推扫”效果, 扫描器半径以及探测器与扫描器的相对位置等参数的选取, 要综合半径、曲率等参数选择。对红外焦平面阵列探测器而言, 比例系数应该满足^[7]:

$$\chi \geq \Delta r / \Delta \theta \quad (13)$$

式中: Δr 表示沿极径方向的位移; $\Delta \theta$ 表示旋转的角度。而探测器与扫描器的位置关系如图3所示。设探测器的长度和宽度分别为 a 和 b , 且 A 和 B 为其左上角顶点和右下角顶点。其中, A 落在调制器的外径上。调制器在推扫过程中, 径向位移 Δr 为探测器对角线的长度。假设调制器的调制周期为 n , 则存在以下关系:

$$\begin{cases} \Delta \theta = 2\pi / n \\ \Delta r = \sqrt{a^2 + b^2} \end{cases} \quad (14)$$

由此求得阿基米德螺旋线参数为:

$$\chi = \frac{\Delta r}{\Delta \theta} = \frac{n\sqrt{a^2 + b^2}}{2\pi} \quad (15)$$

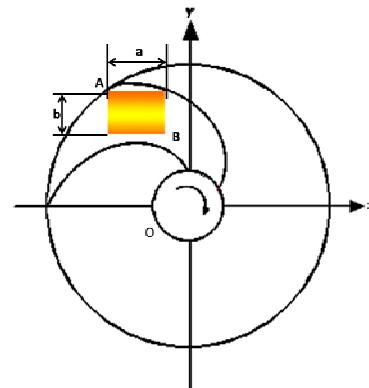


图3 探测器与微扫描器的位置关系

Fig.3 Position relationship of detector to chopper

实际上, 按照此方法求出的阿基米德螺旋线也不能严格意义上实现对探测器的推扫, 而是靠近中间像元先曝光。下章给出了该参数下像元曝光顺序的计算方法。

3 阿基米德螺旋线型微扫描器的像元曝光顺序

按照上一节给出的阿基米德螺旋线型微扫描器的参数, 以具体实例计算焦平面阵列像元的曝光顺序。以像元周期为 $50 \mu\text{m}$ 的 320×240 像元焦平面阵列为例, 其长为 16 mm , 宽为 12 mm , 采用 2×2 步微扫描, 以昆明物理所研究的平板微扫描器结构为基础, 每个阿基米德螺旋线型镜片的参数如下:

$$\Delta r = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{16^2 + 12^2} = 20 \text{ mm} \quad (16)$$

$$\Delta \theta = 2\pi/6 = \pi/3 \text{ rad} \quad (17)$$

$$\chi = \Delta r / \Delta \theta = 60/\pi (\text{mm/rad}) \quad (18)$$

调制器的半径 R 为:

$$R = 40 \text{ mm} \quad (19)$$

焦平面阵列上各像元的标号顺序如图4所示。阵列的列用序数 j 表示, j 从左到右依次增大; 阵列的行用序数 i 表示, i 从下往上依次增加。这样, 每个像元都可以用具体坐标表示出来, 比如, 阵列的最左下角的像元坐标为 $(1, 1)$ 。图中的4个字母 A、B、C、D 表示阵列的4个顶点。

阵列的左上角顶点A在调制器的半径上, 我们取其实际坐标为(-22.5 mm, 33 mm), 则C点的实际坐标为(-22.5 mm, 21 mm)。

用 $r(i,j)$ 表示第 (i,j) 个像元到坐标原点的距离, 则:

$$r(i,j) = \sqrt{(-22.5 + 0.05(j-1))^2 + (21 + 0.05(i-1))^2} \quad (20)$$

式中: $i=1, \dots, 240$; $j=1, \dots, 320$ 。

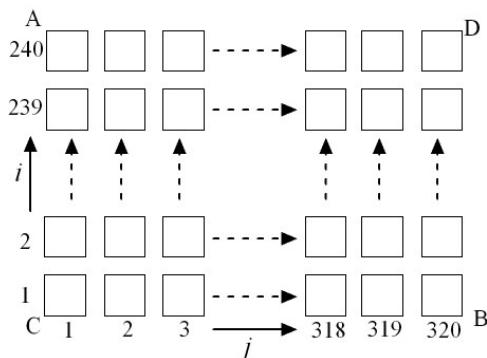


图4 焦平面阵列像元的标号

Fig.4 The sequence of pixels in FPA

以微扫描器的其中一片平板为例, 计算阵列上像元的曝光顺序。由于转过的角度与时间成正比, 故只需要计算像元相对参考位置(水平轴)旋转的角度。

如图5所示, 图中标出的阿基米德螺旋线1(简称螺线1)与阿基米德螺旋线3(简称螺线3)同调制器的边缘构成微扫描器的6片平板扇叶中的一片。可以认为这个区域是由螺线1沿着逆时针方向旋转扫描并止于螺线3形成。区域中的任何一点都在区域内的阿基米德螺旋线上, 如, 图5中P点就落在阿基米德螺旋线2上。螺线3扫过阵列上的像元以后, 该片平板对阵列的曝光结束。需要计算的是螺线3扫过各个像元的顺序。

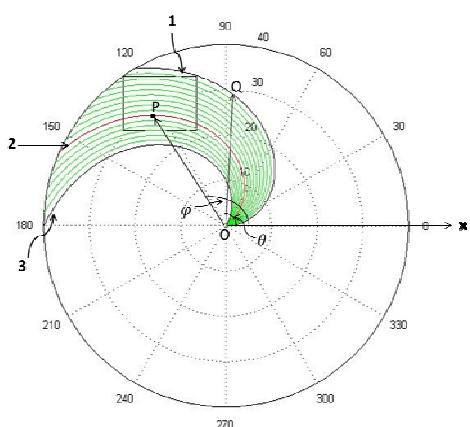


图5 计算像元曝光顺序的原理图

Fig.5 Principle for calculating the exposure sequence

先取阵列上的任意一个像元 (i,j) , 用 P 表示, 该点在螺线2(图5中红线)上。在螺线1上取一点 Q , 使得 $|OP|=|OQ|$ 。设 OP 和 OQ 同 x 轴的夹角分别为 ϕ 与 θ , 令:

$$\alpha = \phi - \theta \quad (21)$$

α 表示螺线2相对螺线1逆时针旋转的角度。而螺线3扫过点 P 时, P 点处的曝光结束。当螺线3经过螺线2的位置时, 需要旋转的角度为 β :

$$\beta = \Delta\theta - \alpha = (\pi/3 - \alpha) \text{ rad} \quad (22)$$

β 越小, 对应像元的曝光结束时间越早, 也就是 α 越大, 像元越早结束曝光。可以通过以下关系求得 α 。 P 点的实际坐标为 (x_j, y_i) :

$$x_j = -22.5 + 0.05(j-1) \quad (23)$$

$$y_i = 21 + 0.05(i-1) \quad (24)$$

$$|\bar{r}(i,j)| = |OP| = |OQ| = \chi\theta \quad (25)$$

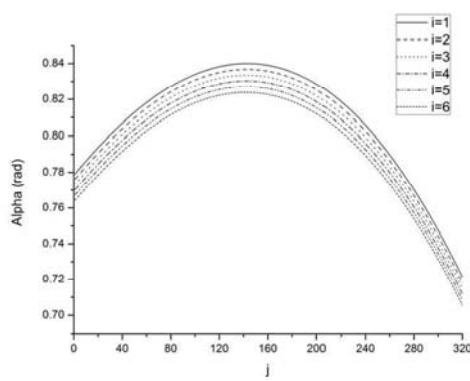
$$y_i = |\bar{r}(i,j)| \sin(\phi) \quad (26)$$

联立式(20)~(21)、(23)~(26), 则可以求出每个像元点对应的 α 值。

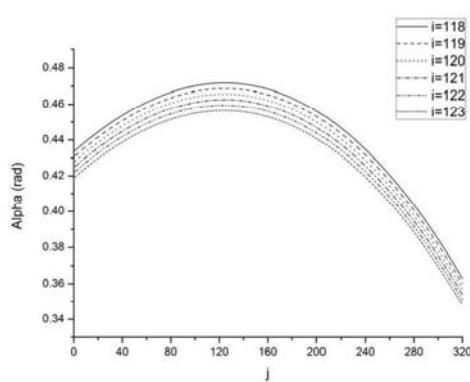
对于有 320×240 个像元的阵列, 数据量大, 故此处没有一一列出。我们取焦平面阵列的下部($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$)、中间($i=118, 119, 120, 121, 122, 123$)和上部($i=235, 236, 237, 238, 239, 240$)三部分像元研究。图6是焦平面阵列三部分像元的曝光顺序。

从图6(a)中可以看出, 对于不同的行, 曲线的走向都是一致的。对每一行来说, 都是中间偏左的像元(α 在 $(1, 143), (2, 143), (3, 142), (4, 142), (5, 142), (6, 142)$ 点处取得对应行的最大值)先曝光。图6(b)、(c)表明对于焦平面阵列的中下部分像元也遵循同样的规律。

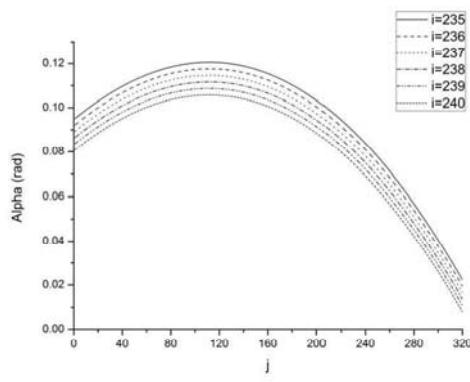
对于每一行来说, 各个像元的曝光顺序是不同的。每行中最先和最后曝光时刻间的差别占整个曝光时间的比例(简称曝光时间误差)可以通过对应角度计算。以 $i=1$ 为例, α 的最大值和最小值分别为 0.84 rad 和 0.72 rad , 两者之差占整个曝光时间的比例为 11.33% (总的曝光时间对应的角度见式(17))。图7是焦平面阵列中不同行像元的曝光时间误差。从图中看出, 行数增加, 该行的曝光时间误差就越小。而行数增加意味着远离调制器的中心, 所以调制器的半径增大, 有助于减小曝光时间误差。



(a)



(b)



(c)

图6 焦平面阵列像元的曝光顺序: (a)下部像元的曝光顺序; (b)中部像元的曝光顺序; (c)上部像元的曝光顺序

Fig.6 Exposure sequence for different parts of pixels in FPA: (a) the bottom part (b) the intermediate part (c) the upper part

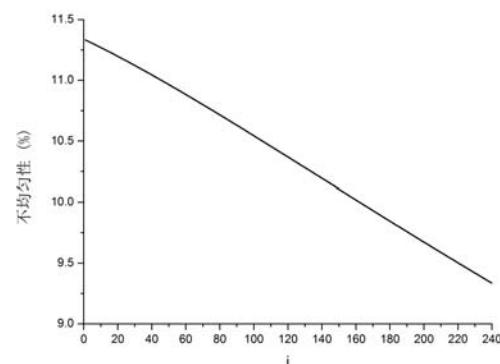


图7 不同行像元的曝光时间误差

Fig.7 The exposure time error of pixels in different rows

在后续的信号获取中,可以根据曝光时间误差的不同选择适当的信号读取顺序,改变像元的增益和直流偏移,实现对信号的初步非均匀性校正。在此基础上,还可以采用数字图像处理技术,对像元的曝光非均匀性做进一步精细校正。像元的曝光顺序与微扫描器的形状以及探测器与微扫描器的相对位置有关,可以根据计算出来的结果来调整这些参数,进而得到比较理想的曝光顺序。

4 结论

本文结合昆明物理所提出的阿基米德螺旋线形平板微扫描器,以具体实例说明了计算各个像元的曝光顺序的方法,分析了不同行的曝光误差。通过计算各个像元的曝光顺序,方便了信号读取顺序的选择,为用数字图像处理方法校正非均匀性提供依据。

参考文献:

- [1] Joseph W Goodman. 傅里叶光学导论[M]. 3 版. 秦克诚, 刘培森, 陈家壁, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [2] 隋修宝. 非制冷凝视热像仪成像理论以及关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学博士学位论文, 2009.
- [3] 张海涛, 赵达尊. 微扫描减少光电成像系统频谱混淆的数学原理及实现[J]. 光学学报, 1999, 19(9): 1263-1268.
- [4] 彭富伦, 冯卓祥. 微扫描对空间分辨率的影响[J]. 应用光学, 2006, 27(5): 394-399.
- [5] 曲艳玲. 红外凝视系统中的微扫描技术[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士论文, 2004.
- [6] 徐超, 金伟其, 李雅琼. 光学微扫描器技术及其实现方式[J]. 红外技术, 2006, 28(6): 338-342.
- [7] 吴新社, 范乃华, 李龙, 等. 铁电型非制冷红外焦平面探测器的调制器设计[J]. 红外技术, 2007, 29(6): 333-336.