

文章编号:1001-9014(2005)04-0261-04

# 扫描型焦平面热成像系统的亚像元处理算法研究

金伟其, 王春勇, 张楠, 王岭雪, 卢萍

(北京理工大学 光电工程系, 北京 100081)

**摘要:**通过对垂直方向具有光学微扫描的 $288 \times 4$ 焦平面热成像过程的分析研究,提出了一种可实现亚像元成像处理算法,在垂直扫描的方向可使探测器传递函数的截止频率提高一倍,可明显改善系统成像质量和作用距离.算法简单,处理工作量小,易于实现实时处理.算法的实现可提高扫描型热成像系统的技术战术性能指标具有重要意义.

**关键词:**  $288 \times 4$ 焦平面探测器;热成像系统;光学微扫描;亚像元

**中图分类号:** TN219 **文献标识码:** A

## STUDY ON SUB-PIXEL PROCESSING ALGORITHM FOR SCANNING FPA THERMAL IMAGING SYSTEM

JIN Wei-Qi, WANG Chun-Yong, ZHANG Nan, WANG Ling-Xue, LU Ping

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on an analysis of imaging process of  $288 \times 4$  FPA (Focal Plane Array) thermal imaging system with vertical micro-scanning, a processing algorithm for realizing sub-pixel imaging was proposed. The method doubles the cut-off frequency in vertical MTF (Modulate Transfer Function) of the detector, and markedly improves the system imaging quality and action range. The algorithm is simple, the amount of treatment is small, and a real time processing is easily achieved. The realization of this algorithm has great significance in improving technological tactic performance of thermal imaging systems.

**Key words:**  $288 \times 4$  FPA detector; thermal imaging system; optical micro-scanning; sub-pixel

### 引言

近年来扫描型红外焦平面探测器技术发展和器件的产品化引人注目,成为高性能二代热成像系统主要的探测器类型之一.法国 SOFRADIR 公司  $288 \times 4$ 、 $480 \times 6$  等探测器<sup>[1]</sup>已成为国际普遍使用的扫描型焦平面探测器类型,Thalze 公司采用  $288 \times 4$  焦平面探测器研制的 Catherine-FC / Catherine-GP/SOPHIE 等均是国际有名的热成像系统. Catherine-FC 热成像系统采用  $288 \times 4$  焦平面探测器与一维光机扫描,形成 288TVL 的标准视频帧图像信号. Catherine-GP 热成像系统则在 FC 的基础上,采用了一种垂直点头式的光学微扫描机构,形成空间重叠的数据采样,产生 576TVL 的标准视频热图像信号.

图像处理技术已成为当前高性能热成像系统的关键技术之一.与一代光机扫描型热成像系统(如采用 8 条 SPRITE 探测器的通用组件热像仪

CNTICM-II)<sup>[2]</sup>采用过扫描采样提高分辨率不同,GP 在微扫描基础上进一步采用了图像处理技术,使其性能指标和作用距离明显高于基于以往技术的热成像系统,实际观察效果较之 FC 有明显改善(图 1 给出 GP 与 FC 作用距离的比较).鉴于我国热成像处理技术与国外的差距,分析和研究适宜的图像处理算法对于发展高性能热成像系统具有重要的意义.本文将通过对垂直扫描信号重构方式的分析,研究与光学微扫描方式结合的亚像元处理算法.

### 1 垂直方向的信号采样与微扫描处理算法

#### 1.1 $288 \times 4$ 焦平面探测器与微扫描的成像模式

$288 \times 4$  焦平面探测器及微扫描成像模式的布局如图 2,图中粗实线表示  $288 \times 4$  焦平面探测器的布局,探测单元的尺寸为  $a \times b$ ,探测器阵列在奇数行/列与偶数行/列均有一错位;垂直方向错位间隔  $c = b$ ,属于空间离散采样成像,相临扫描线的采样间

收稿日期:2004-09-16,修回日期:2005-01-26

Received date: 2004-09-16, revised date: 2005-01-26

基金项目:十五国防预研基金项目(30404)与高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20020007006)

作者简介:金伟其(1961-),男,上海人,工学博士,教授,主要研究方向:夜视与红外技术、光电检测技术、图像处理技术.

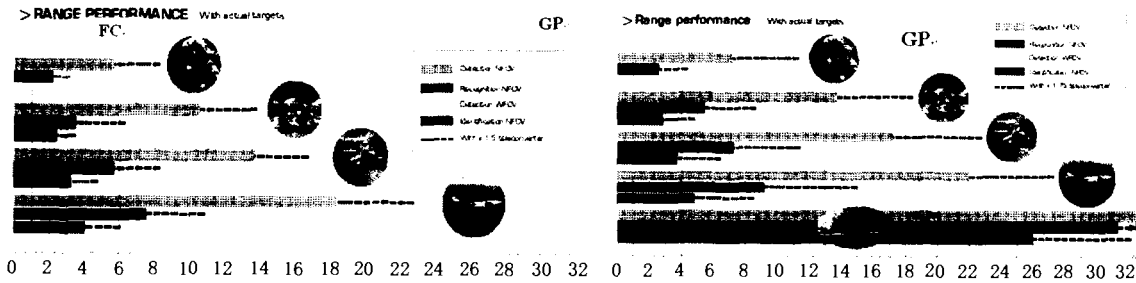


图1 Catherine-FC 和 GP 的作用距离比较  
Fig. 1 Comparison of action ranges of Catherine-FC and Catherine-GP

隔等于探测器间隔  $c$ ; 图中虚线部分为经过光学微扫描后的探测器布局(为便于表示, 图中在水平方向错开了一定位置), 经过两场扫描合成图像的垂直扫描线数为 576 行, 且相邻扫描线的图像采样间隔为  $c/2$ , 即采用微扫描可提高了图像的垂直采样率, 故可获得更高的图像分辨力。

由于水平方向的扫描过程满足空间线性不变性, 通过延时叠加, 可得到增强的连续信号输出, 而光学微扫描不直接对水平方向的信号产生影响, 因此, 下面主要讨论垂直方向的信号采样过程。

在  $288 \times 4$  焦平面探测器一场扫描成像过程中, 垂直方向的图像离散采样过程可近似表示为<sup>[2]</sup>

$$g(y_i) = f(y_i) \times h_0(y_i) \times h_d(y_i) \times h_c(y_i) \quad (1)$$

$(i=0, 1, \dots, N-1)$

式中,  $f(y)$  为输入图像分布;  $h_0(y)$  为成像和扫描光学系统的点扩散函数;  $h_d(y)$  为探测器的响应函数;  $h_c(y)$  为后续信号处理的响应函数;  $g(y_i)$  为探测器离散响应后的输出图像分布 ( $N=288$ )。

通常假设探测器在单元面上具有均匀响应, 即  $h_d(y) = \text{rect}(y/b)$ 。 (2)

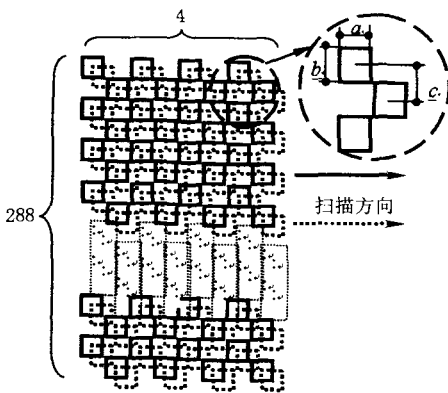


图2 带微扫的  $288 \times 4$  焦平面热成像系统  
Fig. 2  $288 \times 4$  FPA thermal imaging system with micro-scanning

其中,  $\text{rect}(y)$  为单位方波函数;  $b$  为探测器的尺寸。

严格意义上离散采样已不满足传递函数存在的条件, 但目前离散传递函数的概念得到广泛应用。因此, 在描述热成像系统时, 依然采用传递函数的概念<sup>[2-4]</sup>, 且其在奈奎斯特频率之内具有足够的精度。

为了描述离散过程初相位的影响, 在热成像性能评价中以初相位在周期内平均分布为条件, 得到了平均传递函数<sup>[3,4]</sup>

$$\text{MTF}_d(f) = \text{sinc}(\pi bf) \text{sinc}(\pi \delta f) \quad (3)$$

其中,  $\text{sinc}(\pi bf)$  为探测器响应函数式(2)的傅氏变换;  $\text{sinc}(\pi \delta f)$  为采样间隔影响,  $\delta$  为扫描线的间隔;  $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ 。

对于  $288 \times 4$  焦平面探测器,  $f_0 = 1/b = 2f_d$  为探测器频率响应的一级零点, 其通常也是系统的第一个频率响应零点, 称为截止频率;  $f_d$  为奈奎斯特频率。对于不带垂直光学微扫描系统(FC), 扫描线间隔  $\delta = c = b$ , 探测器频率响应和采样间隔影响均为  $\text{sinc}(\pi bf) = \text{sinc}(\pi f/f_0)$  (如图3曲线3), 平均传递函数如图3曲线5。对于具有垂直光学微扫描系统(GP), 按照通常的方法, 探测器的频率响应仍为  $\text{sinc}(\pi f/f_0)$ , 而采样间隔影响  $\text{sinc}[\pi f/(2f_0)]$  如图3曲线1, 平均传递函数为介于曲线3与曲线5之间的曲线4。可以看出:  $f_0$  是决定探测器平均传递函数

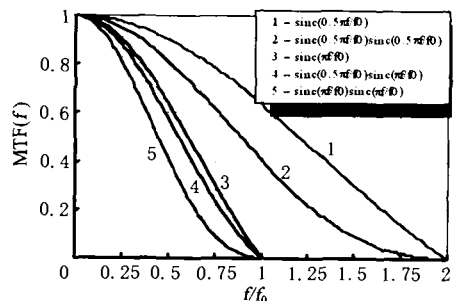


图3 探测器的频率响应与平均传递函数  
Fig. 3 Frequency responses and mean MTF of the FPA

的重要因素,提高 $f_0$ 即减小 $b$ 对于提升整个系统的性能具有重要的作用.

### 1.2 288 × 4 焦平面探测器的信号处理方法

式(1)可改写为 $g(y) = p(y) \times h_d(y)$ ,其中 $p(y)$ 为原图像经光学系统等滤波后的图像.由于探测器尺寸为 $b$ ,在一般意义上探测器对图像的分辨能力将被局限在 $b$ 以内,为此,以 $b/2$ 间隔将 $p(y)$ 离散为 $2N$ 个离散值 $p_j(j = 0, 1, 2, \dots, 2N-1, N = 288)$ .对于PAL视频格式,两场图像构成一帧图像( $288 \times 2 = 576$  TVL),设经过处理后构成的图像为 $g_j$ ,下面分析几种采样及其插值处理方法(如图4).

#### A. 无微扫描(FC)系统的采样处理

##### (1) 零阶加密

奇数场和偶数场对应同一场景,相当于零阶加密处理,处理算法可表示为

$$g_{1_{2i}} = (p_{2i} + p_{2i+1})/2, g_{1_{2i+1}} = g_{1_{2i}} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (4)$$

##### (2) 一阶加密

奇数场采自场景,偶数场由奇数场相邻的两行线性插值得到,处理过程可表示为

$$\begin{aligned} g_{2_{2i}} &= (p_{2i} + p_{2i+1})/2, g_{2_{2i+1}} \\ &= (p_{2i} + p_{2i+1} + p_{2i+2} + p_{2i+3})/4, g_{2_{2N-1}} \\ &= g_{2_{2N-2}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $g_{2_{2N-1}}$ 做了强制处理.

#### B. 光学微扫描器(GP)系统的一般处理方法

将微扫描前后得到的两场图像分别作为奇数场和偶数场是目前最直接也是常用的处理方法

$$g_3_j = (p_j + p_{j+1})/2 \quad (6)$$

需要指出: $g_{3_{2N-1}} = p_{2N-1} + p_{2N}$ 中涉及的 $p_{2N}$ 将在后续进行专门的讨论.

### 1.3 一种新的微扫描信号处理方法

#### A. 算法

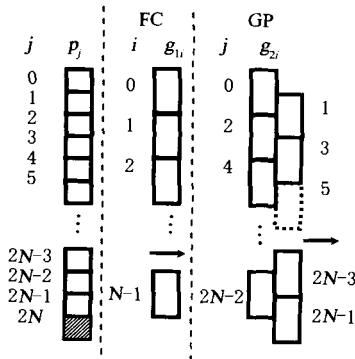


图4 图像的离散与采样过程

Fig. 4 Dispersion and sampling processes of images

注意到式(6)可写为矩阵形式

$$G = \frac{1}{2} \{AP + P_0\} \quad (7)$$

$$G = [g_{3_0} \ g_{3_1} \ g_{3_2} \ \dots \ g_{3_{2N-2}} \ g_{3_{2N-1}}]^T,$$

式中, $P = [p_0 \ p_1 \ p_2 \ \dots \ p_{2N-2} \ p_{2N-1}]^T,$

$$P_0 = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ p_{2N}]^T.$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于变换矩阵 $A$ 可逆,求解式(7)可得

$$P = A^{-1}(2G - P_0) \quad (9)$$

即由探测器获得的图像信号 $G$ ,可以精确地复现原图像 $P$ 的分布.

式(9)的处理算法可具体写为

$$\begin{cases} g_{4_{2N-1}} = 2g_{3_{2N-1}} - p_{2N}, \\ g_{4_{2N-1-j}} = 2g_{3_{2N-1-j}} - g_{4_{2N-j}} \quad (j = 1, 2, \dots, 2N-1) \end{cases} \quad (10)$$

#### B. 分析与讨论

通过对式(10)的分析,可了解到算法的特点:

(1) 在忽略探测器噪声的条件下,算法可精确地恢复原图像 $P$ ,即相当于探测器的响应宽度等效于亚像元 $b/2$ 成像,结合采样间隔 $c/2$ 的影响,平均传递函数 $MTF_d(f)$ 为 $\text{sinc}^2(0.5\pi f/f_0)$ ,即平均传递函数由图3之曲线4提高到曲线2,不仅探测器传递函数明显提升,且截止频率增加了1倍( $2f_0$ ).考虑到微扫描成像时探测器面积仍保持 $a \times b$ ,其接收的信号和噪声没有变化,而系统最小可分辨温差 $MRTD(f)$ 与 $MTF_d(f)$ 近似成反比,故微扫描处理将使热成像系统 $MRTD(f)$ 明显减小(即性能提高),特别是高频性能的改善将有效提高系统的作用距离.

(2) 算法至关重要的一步是确定 $p_{2N}$ .如果在光学系统或扫描器光路对应 $p_{2N}$ 的视场处预设固定的目标场景或黑体(在一代热成像中已有类似技术应用),则经过预先标定可获得 $p_{2N}$ 值.如果不能预置目标场景,考虑到行间灰度变化不大,可假定 $p_{2N}$ 预测值 $\bar{p}_{2N} \approx p_{2N-1}$ ,由偏差 $\varepsilon = |p_{2N} - \bar{p}_{2N}|$ 将在 $0 \sim 2N-1$ 扫描行中形成正负交错幅值为 $\varepsilon/2$ 的信号偏差.

(3) 注意到 $p_j$ 的编序是相对的,即黑体也可预设设在 $p_0$ ,算法处理可与微扫描过程同步进行,由于处理量非常小,完全可实现实时亚像元成像处理.

(4) 由于等效探测器响应面积( $b/2$ )的减半,在

$p_j$  中光学成像的衍射效应可能成为主要的限制,其影响可进一步采用超分辨率图像处理方法<sup>[5]</sup>减弱。

1.4 算法模拟与比较

为比较处理算法重现原图像分布的精度,我们以图 5 所示三条函数曲线进行分析,函数的定义为

$$p_1(y) = \text{INT}\{2^{11} e^{-0.005y} [\cos(0.03y) + 1]\},$$

$$p_2(y) = \text{INT}\{2^{12} [e^{-0.0003y^2} + e^{-0.0003(y-200)^2} + 0.8e^{-0.0003(y-500)^2}]\},$$

$$p_3(y) = \text{INT}\{2^{12} [e^{-0.0003y^2} + \exp^{-0.0003(y-250)^2} + 0.8e^{-0.0003(y-570)^2}]\}.$$

其中 INT() 为取整函数,即将函数值归整为 0 ~ 4 098 的整数值.表 1 给出了本文所给几种处理算法对 3 条曲线的复原精度参数.可以看出:

(1) 在  $p_{2N}$  已知的条件下,微扫描处理方法可准确复原原图像信号,统计偏差均为零。

(2) 对于强制  $p_{2N} \leftarrow p_{2N-1}$  处理将产生交错偏差,且偏差程度与  $p_{2N} - p_{2N-1}$  成正比。

(3) 零阶插值与一阶插值的统计参数基本相同,说明插值处理并未在提高系统的分辨力,但由于零阶插值的偏差属于交错形式,而一阶插值的偏差与  $\partial p(y)/\partial y$  成正比,在整个图像区域较平缓,因此,在实际图像的主观观察上,一阶插值可能好于零阶插值(存在逐行交错变化的灰度跳动),即在没有光学微扫描的  $288 \times 4$  焦平面探测器系统中,采用一阶插值方法重建图像帧具有一定的作用。

(4) 微扫描一般处理方法与一阶插值不仅在统计数据基本相同,且在复原数据偏差分布上也基本相同,这再次说明探测器响应面积影响的重要性。

3 结语

利用光学微扫描技术是提高热成像系统性能的有效技术途径,但必须与后续图像处理相配合才能获得明显的图像改善. 本文提出的处理方法可有效

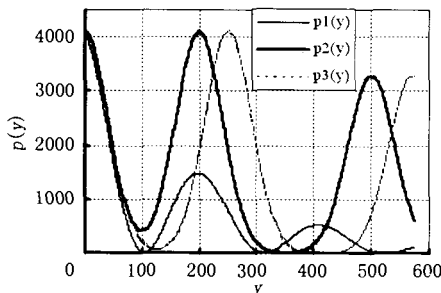


图 5 几种目标分布函数曲线  
Fig. 5 Curves of several target distribution functions

表 1 几种处理算法的结果比较

Table 1 Comparison of the results of several processing algorithms

方法	与参数	$p_1(y)$	$p_2(y)$	$p_3(y)$
零阶插值	Max( $g-p$ )	29	30.5	30.5
	Min( $g-p$ )	-29	-30.5	-30.5
	$\overline{(g-p)}$	0	0	0
一阶插值	$\sigma$	10.4	18.0	16.9
	Max( $g-p$ )	12.5	30.75	30.5
	Min( $g-p$ )	-29.5	-30.75	-30.75
微扫描一般处理	$\overline{(g-p)}$	-3.45	-3.04	-0.737
	$\sigma$	10.39	18.05	16.95
	Max( $g-p$ )	12.9	30.5	30.5
本文微扫描处理 ( $p_{2N}$ 已知)	Min( $g-p$ )	-29.5	-30.5	-30.5
	$\overline{(g-p)}$	-3.46	-3.05	-0.742
	$\sigma$	10.40	18.05	16.95
本文微扫描处理 ( $p_{2N} \leftarrow p_{2N-1}$ )	Max( $g-p$ )	0	0	0
	Min( $g-p$ )	0	0	0
	$\overline{(g-p)}$	0	0	0
本文微扫描处理 ( $p_{2N} \leftarrow p_{2N-1}$ )	$\sigma$	0	0	0
	Max( $g-p$ )	3	27	11
	Min( $g-p$ )	-3	-27	-11
本文微扫描处理 ( $p_{2N} \leftarrow p_{2N-1}$ )	$\overline{(g-p)}$	0	0	0
	$\sigma$	3	27	11

地提高扫描型焦平面热成像系统的成像分辨力,实现亚像元成像,改善系统的作用距离,因此,算法可作为基于光学微扫描的  $288 \times 4$  焦平面热成像系统的基本算法之一,同时,算法研究也间接地说明了 GP 热成像系统较以往预测模型具有更远作用距离的原因.此外,算法也适合探测器有空间重叠的  $480 \times 4$  或  $576 \times 6$  扫描型热成像系统的亚像元处理。

由于本文处理方法处理量小,效果明显,且所涉及的一些关键技术(诸如扫描视场中预设固定场景或黑体的技术等)已在以往的一些应用中基本解决,因此算法具有技术可行性,可望获得实际应用。

REFERENCES

[1] JIN Wei-Qi, ZHANG Wei-Qiang, WANG Chun-Yong. Analysis of second-generation thermal imaging system based on  $288 \times 4$  focal plane detector [J]. *Infrared Technology* (金伟其,张未强,王春勇.基于  $288 \times 4$  焦平面探测器的二代热成像系统分析.红外技术), 2004, 26(2): 1—5.

[2] ZHANG Jing-Xian, LI Yu-Dan, JIN Wei-Qi. *Low Light Level and Infrared Imaging Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (张敬贤,李玉丹,金伟其.微光与红外成像技术.北京:北京理工大学出版社) 1995, 9.

[3] Sendall R L, Rosell R A. Static performance model based on the perfect synchronous integrator model [R]. AD/A - 073763. Appendix D, 1979

[4] Scott L B, Agostino J D. NVEOD FLIR92 thermal imaging systems performance model [C]. *Proc. SPIE Aerospace Sensing Symposium*, 1992, 1689(13): 194—203.

[5] SU Bing-Hua, JIN Wei-Qi. Super-resolution image restoration algorithm based on Poisson-Markov model [J]. *Acta Electronica Sinica* (苏秉华,金伟其.基于 Poisson-Markov 场的超分辨率图像复原算法.电子学报), 2003, 31(1): 41—44.