

文章编号:1001-9014(2007)05-0377-03

# 红外图像空间分辨率提高方法研究

隋修宝, 陈钱, 陆红红

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**分别研究了微扫描技术与虚拟电子微扫描技术在提高红外图像空间分辨率方面的原理,指出了纯粹利用微扫描技术的局限性,提出了微扫描技术与自适应虚拟电子微扫描技术相结合的方法,理论和实验结果表明,该方法可以大幅度地提高红外图像的空间分辨率。

**关键词:**光学;空间分辨率;复合技术;红外图像;微扫描;虚拟电子微扫描

**中图分类号:**TN911.73 **文献标识码:**A

## RESEARCH ON IMPROVING SPATIAL RESOLUTION OF INFRARED IMAGE

SUI Xiu-Bao, CHEN Qian, LU Hong-Hong

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, NUST, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The principles of microscan and adaptive dummy electronic microscan were studied for improving spatial resolution of infrared image. The limitation of using microscan only was pointed out. The method of making use of microscan and adaptive dummy electronic microscan was produced. Both the theory and experiments demonstrate that the method can improve the spatial resolution of infrared image greatly.

**Key words:** optics; spatial resolution; complex technique; infrared image; microscan; dummy electronic microscan

### 引言

当前由于红外焦平面阵列制作工艺及量子效率等问题,高密度小像素尺寸的红外焦平面器件的制作尚存在一定困难,而且价格昂贵;探测器阵列的结构组织和当前的技术水平又无法满足填充因子达到100%,而根据尼奎斯特(Nyquist)采样定理,焦平面阵列的采样频率就有一定的限制,红外焦平面阵列空间采样频率很难达到自然场景图像尼奎斯特频率的二倍,此时红外图像就会因欠采样而引起信号混叠,造成红外图像模糊,空间分辨率较低.当前提高红外图像空间分辨率的方法主要有微扫描法<sup>[1]</sup>和超分辨率图像复原法.

国外有对毫米波图像重建提出了将微扫描和超分辨率相结合的想法,本文将该思路应用于红外图像上,即将微扫描图像重构法和超分辨率图像复原法-自适应虚拟电子微扫描技术应用在图像重建上,取得了较好的效果.

### 1 微扫描技术

微扫描就是利用微扫描装置将光学系统所成的图像在X、Y方向分别进行 $1/N$ ( $N$ 为整数)像素距的位移,得到 $N \times N$ 帧欠抽样图像;并运用数字图像处理将多帧经过亚像素位移的图像重建成一帧图像,从而达到最终实现提高分辨率的目的<sup>[2]</sup>.

从以往对于微扫描成像的研究看,存在4种常用的微扫描模式,它们分别是 $1 \times 1$ 、 $2 \times 2$ 、 $3 \times 3$ 和 $4 \times 4$ 的微扫描,图1以 $2 \times 2$ 微扫描为例说明微扫描的原理<sup>[1]</sup>:微扫描得到4幅子图像,通过信号处理电路将4幅子图像合成一幅图像,这样空间分辨率得到显著提高.

用理论分析的方法看微扫描技术的性能,在频域内分析得到<sup>[3]</sup>:

$$\text{comb}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x-n, y-m), \quad (1)$$

式中 $m, n$ 分别为Y、X方向的像素偏移量;

收稿日期:2007-03-05,修回日期:2007-07-24

基金项目:国防预研资助项目(40405050303)

作者简介:隋修宝(1981-),男,山东烟台人,博士生,主要从事红外图像处理和探测器机理研究.

Received date: 2007-03-05, revised date: 2007-07-24

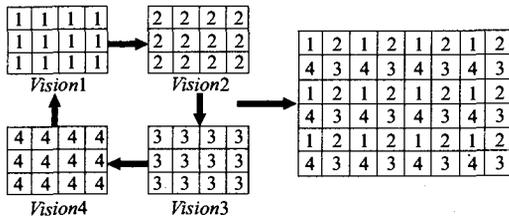


图1 提高空间分辨率的微扫描技术原理  
Fig.1 Principle of microscanning technique to improve resolution

$comb(x, y)$  定义为梳状函数,  $(x, y)$  为图像在 X, Y 方向的位置坐标;

$\delta$  为狄利克利函数.

$$I_s(\zeta, \eta) = [A(w_x \zeta, w_y \eta) O(\zeta, \eta) \times P(\zeta, \eta)] \times comb(d_x \zeta, d_y \eta) \quad (2)$$

式中  $O(\zeta, \eta)$  是目标函数;  $P(\zeta, \eta)$  是光学系统的调制传输函数 MTF;  $A(\varphi, \phi)$  是探测器单元(像素)的形状函数.  $w_x$  和  $w_y$  分别为 X 和 Y 方向对应单元探测器的宽度,  $d_x$  和  $d_y$  分别为 X 和 Y 方向对应的单元探测器与单元探测器间的间距. 从上面的式子可以看出光学系统和探测器阵列滤掉了目标的高频部分. 考虑  $2 \times 2, 4$  步微扫描的情况, 它产生同一场景的 4 幅图像, 在相邻的图像中, 改变的只是相对于采样阵列的图像的位置.

微扫描过程产生的采样图像(频域)为:

$$I_{ms,s}(\zeta, \eta) = \frac{1}{4} [A(w_x \zeta, w_y \eta) O(\zeta, \eta) P(\zeta, \eta)] \times comb(d_x \zeta, d_y \eta) \{1 + e^{-imn} + e^{-inm} + e^{-i(m+n)}\} \quad (3)$$

比较式(2)和式(3)可以看出: 两式不同之处在于式(3)中多了复指数之和. 括号内相加的式子决定了与微扫描过程得到的每幅图像相关的谐波函数部分是如何相加的. 微扫描技术使得基带频谱的谐波重叠的部分减少了, 从而提高了系统的空间分辨率<sup>[4]</sup>.

理论推导表明微扫描能够提高系统的空间分辨率, 下面以  $288 \times 4$  为例分析重构图像方法<sup>[5]</sup>.

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:

$$g(y) = p(y) \times h_d(y) \quad (4)$$

其中  $g(y)$  为探测器离散响应后的输出图像分布;  $p(y)$  为原图像经过光学系统等滤波后的图像;  $h_d(y)$  为探测器的响应函数.

以探测器  $b/2$  ( $b$  为探测器尺寸) 为间隔将  $p(y)$  离散为  $2N$  个离散值  $p_j (j=0, 1, \dots, 2N-1, N=288)$ . 对于 PAL 视频格式, 两场图像构成一帧图像 ( $288 \times$

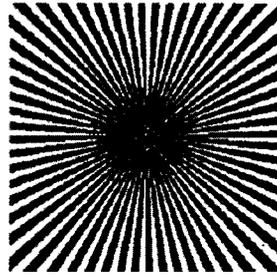


图2 原始图像  
Fig.2 Original image

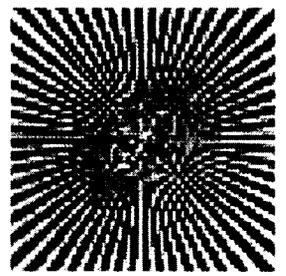


图3 未经过微扫描图像  
Fig.3 Image without microscanning

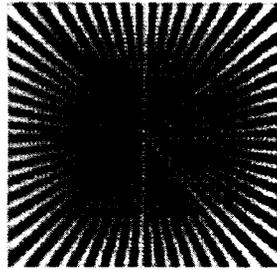


图4  $2 \times 2$  微扫描图像  
Fig.4  $2 \times 2$  microscanning image

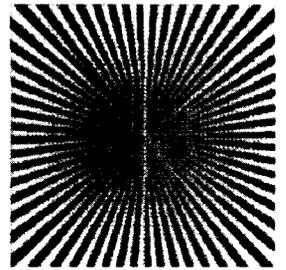


图5  $3 \times 3$  微扫描图像  
Fig.5  $3 \times 3$  microscanning image

$2 = 576$  TVL), 设经过处理后构成的图像为  $g_j$ , 将微扫描后的两场图像分别作为奇数场和偶数场:

$$g_j = (p_j + p_{j+1})/2 \quad (5)$$

其中:

$$g_{2N-1} = p_{2N-1} + p_{2N} \quad (6)$$

根据上述微扫描图像重构算法进行仿真. 将一幅  $576 \times 576$  像素的辐条图像作为原始图像, 如图 2 所示, 针对 100% 占空比的探测器阵列, 分别进行不同步数的微扫描得到图 3 至图 5. 从成像仿真效果图可以看出, 欠采样噪声逐渐减少, 图像空间分辨率逐渐提高. 然而, 随着微扫描步数的增加, 图像质量提高的程度在减少, 单次采样到  $2 \times 2$  微扫描欠采样噪声衰减的幅度最大, 之后  $3 \times 3$  欠采样噪声衰减的并不明显, 因此更多级的微扫描对图像质量的改善并不能起到很大的作用, 这是由于分辨率误差只与输入信号和采样前滤波器的输出信号之差有关, 并不随采样频率的提高而降低. 然而通过超分辨率技术复原衍射限频率之外的部分高频信息, 则可进一步将空间分辨率提高<sup>[6]</sup>.

## 2 自适应虚拟电子微扫描技术

该算法的基本思想是: 像素灰度与邻点灰度的差异越大, 表示该点越不同于该区域, 属于噪声或边缘点, 其加权值即其决定作用应该越小, 基于自适应

放大的红外图像像素倍增技术可以描述为<sup>[7]</sup>:

(1) 根据图像的统计特征得到各点的加权值:

$$g(i,j) = \sum_{k=\pm 1} |f(i,j) - f(i+k,j)| + \sum_{k=\pm 1} |f(i,j) - f(i,j+k)|, \quad (7)$$

式中  $f(i,j)$  为图像中坐标为  $(i,j)$  的像素的灰度值;  $g(i,j)$  定义为综合差异因子;  $g(i,j)$  的直方图用  $his[k]$  表示.

$$w(i,j) = 1 - \frac{\sum_{i=0}^k his[i]}{W \times H}, \quad (8)$$

式中  $w(i,j)$  定义为坐标点  $(i,j)$  的权值;  $W \times H$  表示图像的列阵规模.

(2) 利用加权均值方法分 4 种方法分别计算原像素点与新插值点的灰度:

a. 原像素用原图  $3 \times 3$  邻域的加权滤波表示:

$$f'(i,j) = \frac{\sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 w(i+k,j+l) \times f(i+k,j+l)}{\sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 w(i+k,j+l)}. \quad (9)$$

b. 水平半像素点用最近的两个水平方块像素的加权滤波表示:

$$f'(i+1/2,j) = \frac{\sum_{k=0}^1 w(i+k,j) \times f(i+k,j)}{\sum_{k=0}^1 w(i+k,j)}. \quad (10)$$

c. 垂直半像素点用最近的两个垂直方块像素的加权滤波表示:

$$f'(i,j+1/2) = \frac{\sum_{k=0}^1 w(i,j+k) \times f(i,j+k)}{\sum_{k=0}^1 w(i,j+k)}. \quad (11)$$

d. 双向半像素点用最近的 4 个方块像素的加权滤波表示:

$$f'(i+1/2,j+1/2) = \frac{\sum_{k=0}^1 \sum_{l=0}^1 w(i+l,j+k) \times f(i+l,j+k)}{\sum_{k=0}^1 \sum_{l=0}^1 w(i+l,j+k)}, \quad (12)$$

经过上述步骤便可以完成自适应虚拟电子微扫描算法.

### 3 微扫描复合自适应虚拟电子微扫描技术

微扫描复合自适应虚拟电子微扫描技术是在低级数(如  $2 \times 2$ )微扫描的基础上,采用自适应虚拟电子微扫描算法来提高红外图像的空间分辨率的一种

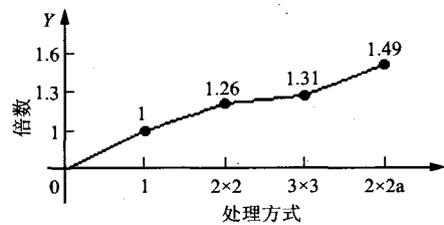


图 6 微扫描步数与空间分辨率关系曲线  
Fig. 6 Curve of microscanning steps and spatial resolution



图 7 原始图像  
Fig. 7 Original image

技术.

根据上两节的论述,微扫描图像重构和自适应虚拟电子微扫描算法都能够单独实现,将两种方法按先后顺序应用于图像处理便完成了微扫描复合自适应虚拟电子微扫描技术.

为了验证微扫描复合自适应虚拟电子微扫描算法的实际效果,对  $64 \times 64$  的红外探测器进行  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  的微扫描后采用  $2 \times 2$  微扫描复合自适应虚拟电子微扫描算法,并将各方式的空间分辨率提高数据对比于图 6,同时各方式图像进行对比,分别如图 7、图 8、图 9 所示.

由图 6 可以看出,经过  $2 \times 2$  微扫描后的空间分辨率是不经过微扫描的 1.26 倍,由  $2 \times 2$  微扫描到  $3 \times 3$  微扫描,空间分辨率仅仅从 1.26 倍提高到 1.31 倍,而在  $2 \times 2$  微扫描的基础上复合自适应虚拟微扫描技术(图 6 中横坐标为“ $2 \times 2a$ ”对应的处理方式),其空间分辨率又大幅度提高到不经过微扫描的 1.49 倍.

通过对图 7、图 8 和图 9 的对比也可以发现,图(8) $2 \times 2$  微扫描图像较图 7 原始图像的空间分辨率有大幅提高,而图(9) $2 \times 2$  微扫描复合自适应虚拟电子微扫描图像的空间分辨率较图 8 又有较大提高.

(下转 385 页)

- [8] Wang Bo, Pan Quan, Zhang Hong-cai, *et al.* Signal filtering algorithm based on the wavelet transformation[J]. *Acta Electronica Sinica*(王博,潘泉,张洪才,等. 基于尺度相关的小波滤波算法研究. *电子学报*), 1999, **27**(11): 70—73.
- [9] YANG Lei, YANG Jie, ZHENG Zhong-Long. Detecting in-

frared small targets based on adaptive local energy threshold under sea-sky complex back grounds[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(杨磊,杨杰,郑忠龙. 海空复杂背景中基于自适应局部能量阈值的红外小目标检测. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(1): 41—45.

(上接 379 页)



图 8 2×2 微扫描图像  
Fig. 8 2×2 microscanning image



图 9 采用 2×2 微扫描复合自适应虚拟电子微扫描技术图像  
Fig. 9 The image with 2×2 microscan and adaptive dummy electronic microscanning technique

由此可以看出:微扫描复合自适应虚拟电子微扫描技术相比较单纯的微扫描技术更能够较大程度的提高红外图像的空间分辨率。

#### 4 结论

微扫描技术的出现有效的弥补了红外探测器的性能缺陷,一定程度上提高了红外图像的空间分辨率,然而随着微扫描级数的增多控制将愈加复杂,同

时红外图像的空间分辨率也并没有随着微扫描级数的增加有显著的提高.而微扫描复合自适应虚拟电子微扫描技术则采用在低级数(比如 2×2)微扫描基础上再进行自适应虚拟电子微扫描的方法,较大幅度地提高了红外图像的空间分辨率,是提高红外图像空间分辨率的有效途径。

#### REFERENCES

- [1] WU Xin-She, CAI Yi. Techniques of optical microscan in staring infrared imaging system [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(吴新社,蔡毅. 红外凝视成像系统中的光学微扫描技术. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(1): 10—14.
- [2] QU Yan-ling, LU Yong-jun, SONG Min. Micro-scanning technique in infrared staring systems [J]. *SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS*(曲艳玲,芦永军,宋敏. 红外凝视系统中的微扫描技术. *半导体光电*), 2005, **26**(s1): 146—148.
- [3] Edward A Watson, Robert A Muse, Fred P Blommel. Aliasing and blurring in microscanned imagery [J]. *Proc. SPIE*, 1992, **1689**: 242—250.
- [4] ZUO Yue-ping, ZHANG Jian-qi. Technique to improve resolution and imagery of a given imager-microscanning [J]. *Infrared Technology*(左月萍,张建奇. 一种提高系统分辨率、改善图像质量的技术—微扫描. *红外技术*), 2001, **23**(4): 15—21.
- [5] JIN Wei-Qi, WANG Chun-Yong, ZHANG Nan, *et al.* Study on Sub-Pixel processing algorithm for scanning FPA thermal imaging system [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(金伟其,王春勇,张楠,等. 扫描型焦平面热成像系统的亚像元处理算法研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(4): 261—264.
- [6] ZHANG Nan, JIN Wei-qi, SU Bing-hua, *et al.* Research and recent advance of high resolution infrared image reconstruction technology [J]. *ACTA ARMAMENTARII*(张楠,金伟其,苏秉华,等. 高分辨率红外热图像重建算法的进展及研究. *兵工学报*), 2005, **26**(2): 173—176.
- [7] GU Guo-hua, FENG Guo-jin, CHEN Qian, *et al.* Adaptive dummy electric micro-scanning technique for IR FPA image pixels enhancing [J]. *OPTOELECTRONIC TECHNOLOGY*(顾国华,冯国进,陈钱,等. 自适应虚拟电子微扫描红外焦平面像素倍增技术. *光电子技术*), 2004, **24**(4): 243—253.