

文章编号:1001-9014(2011)06-0499-05

# 基于配准的红外焦平面阵列条纹非均匀性校正

任建乐, 陈 钱, 钱惟贤

(南京理工大学 近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 条纹非均匀性是线扫红外焦平面阵列和非制冷凝视型红外焦平面阵列成像系统中一种特殊的固定图案噪声. 分析了其产生的原因, 提出了一种基于亮度恒定假设和配准的条纹非均匀性校正算法. 根据相邻两帧获得亮度均方误差函数, 最后通过最小化全局亮度均方误差函数得到全局最优解作为非均匀性校正的参数. 实验结果表明, 该算法能够在几帧内达到较好的收敛, 且计算简单, 有效提高了条纹非均匀性的校正效果.

**关键词:** 红外焦平面阵列; 条纹非均匀性校正; 亮度恒定; 配准;

**中图分类号:** TN911.73 **文献标识码:** A

## Stripe nonuniformity correction based on registration for infrared-focal plane arrays

REN Jian-Le, CHEN Qian, QIAN Wei-Xian

(Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Stripe nonuniformity is a very typical fixed pattern noise in line infrared focal plane arrays (IR-FPA) and uncooled staring IR-FPA. Its origination was analyzed. A stripe nonuniformity correction algorithm based on brightness constancy assumption and registration was proposed. Brightness mean-square error function was obtained according to adjacent frames. Nonuniformity correction parameters could be derived through the unique global optimum by minimizing the function. Experimental results indicate that the proposed algorithm could achieve a great convergence in several frames with low computational complexity and enhance the effective of stripe nonuniformity correction.

**Key words:** infrared focal plane array (IRFPA); stripe nonuniformity correction; brightness constancy; registration

**PACS:** 42.30. Wb

### 引言

受材料、工艺水平等因素的限制, 红外焦平面阵列(IRFPA)的每个探测元的响应度不完全一致, 在图像上表现为固定图像噪声(FPN), 即非均匀性(NU)<sup>[1-2]</sup>. 列向条纹非均匀性作为一种特殊的非均匀性, 在线扫和非制冷凝视型红外焦平面阵列成像系统中尤为突出. IRFPA非均匀性校正的算法分为基于定标的非均匀性校正技术和基于场景的非均匀性校正技术. 后者能够实时更新红外成像系统非均匀性校正参数, 且具有自适应校正的优点, 为国内外非均匀性研究热点<sup>[1]</sup>.

Harris 和 Chiang 提出了恒定统计约束非均匀性校正算法<sup>[1]</sup>, Scribner 等人提出了基于神经网络的

非均匀性校正算法<sup>[2-3]</sup>, Hardie 等人提出了基于配准类的非均匀性校正算法<sup>[4]</sup>. 近几年来, 针对条纹非均匀性, H. Shen 等人提出了基于离散傅里叶变换的低通滤波校正方法<sup>[7]</sup>, Z. Yang 和 J. Li 等人提出了基于小波变换的尺度和方向特性的去条纹算法<sup>[8]</sup>, 钱等人提出了基于边缘灰度级共生矩阵的条纹非均匀性校正方法<sup>[9]</sup>, 此方法通过构造梯度能量非线性方程, 能够在单帧内去除非均匀性, 但容易残留低频噪声.

在分析了其它非均匀性校正算法(一元线性时不变响应模型  $Y_n(i, j) = G_n(i, j)X_n(i, j) + O_n(i, j)$ ,  $G_n(i, j)$  是像元增益系数,  $O_n(i, j)$  是像元偏置系数,  $X_n(i, j)$  是红外辐射,  $Y_n(i, j)$  是观测响应输出值)的基础上, 通过相邻两帧相同场景亮度恒定不变的假

收稿日期: 2011-01-05, 修回日期: 2011-06-24

Received date: 2011-01-05, revised date: 2011-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61101199); 江苏省自然科学基金(BK2011699); 江苏省博士后科研资助计划项目(1101081C)

作者简介: 任建乐(1987-), 男, 江苏南京人, 博士研究生, 主要从事红外图像实时处理和红外目标探测识别等方面的研究, E-mail: kyleren2010@gmail.com.

设,计算两帧之间的相对位移,得到相对两列的非均匀性偏置关系,在几帧运动内使得所有列向像素关联起来,建立了基于配准类的条纹非均匀性校正模型,构造全局亮度均方误差函数,通过求解二次线性规划方程得到非均匀性校正参数,能够有效地去除条纹非均匀性。

## 1 非均匀性模型

线扫红外焦平面阵列和非制冷凝视红外焦平面阵列有着相同的条纹非均匀性产生机制,非制冷凝视红外焦平面阵列都是基于 CMOS 架构的,该架构含有多个放大器,但通常为了节省成本,探测器一列输出共用一个放大器,由此产生了列向的条纹非均匀性. 首先,假设探测器工作在线性输入-输出范围,即在  $n$  时刻对于第  $(i, j)$  个红外焦平面阵列探测单元,观测输出值  $Y_n(i, j)$  用线性模型来表示,则

$$Y_n(i, j) = G_n(i, j)X_n(i, j) + O_n(i, j) \quad (1)$$

$(i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N)$

式(1)中,  $M$  为图像的行数,  $N$  为图像的列数,  $n$  是图像序列的帧数( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),  $G_n(i, j)$ ,  $Q_n(i, j)$  分别是  $n$  时刻第  $(i, j)$  个焦平面探测元的增益和偏置.  $X_n(i, j)$  为  $n$  时刻第  $(i, j)$  个焦平面探测元所接收到的辐照度. 在较短时间内,都可以假设增益和偏置是保持不变的. 针对文中提出的条纹非均匀性,输出  $Y_n(i, j)$  用式(2)表示:

$$Y_n(i, j) = G_n(j)X_n(i, j) + Q_n(j) \quad (2)$$

为了简化而不失一般性,可以假设增益  $G_n(j) = 1$ , 非均匀性集中在偏置  $Q_n(j)$  上. 所以,  $Y_n(i, j)$  可以简化为:

$$Y_n(i, j) = X_n(i, j) + O_n(j) \quad (3)$$

## 2 非均匀性校正

首先,只考虑非均匀性的偏置部分而忽略增益. 假设相邻两帧之间场景亮度恒定,即沿着运动轨迹上场景的入射辐照度保持不变. 得到相邻两帧之间如下关系:

$$X_n(i, j) = X_{n-1}(i + d_x(n), j + d_x(n)) \quad (4)$$

其中,  $d_x(n)$ ,  $d_y(n)$  分别为第  $n$  帧相对于第  $(n-1)$  帧在水平和垂直方向上的位移,  $X_n(i, j)$  是  $n$  时刻第  $(i, j)$  个焦平面探测元所接收到的辐照度. 采用基于梯度方法<sup>[10-11]</sup>对第  $n$  帧和第  $(n-1)$  帧进行配准,得到  $d_x(n)$ ,  $d_y(n)$ . 由于非均匀性的存在,导致  $Y_n(i, j)$  与  $Y_{n-1}(i + d_x(n), j + d_x(n))$  不相等. 通过估计值(观测值)代替理想值,得到:

$$\hat{Y}_n(i, j) = Y_n(i, j) + b_n(j) \quad (5)$$

其中,  $\hat{Y}_n(i, j)$  为校正后的观测值,  $b_n(j)$  即为非均匀性校正的偏置参数.

考虑到条纹非均匀性的特殊性和降低计算复杂度,采用第  $j$  列的均值作为此列的观测值,构造  $\hat{Y}_n(i, j)$  与  $\hat{Y}_{n-1}(i + d_x(n), j + d_x(n))$  的亮度均方误差函数如下:

$$\begin{aligned} E_b(n) &= \sum_j E_b(j, n) \\ &= \sum_{j \in D_x(n)} \sum_{i \in D_y(n)} [\hat{Y}_n(i, j) - \hat{Y}_{n-1}(i + d_x(n), j + d_x(n))]^2 \\ &= \sum_{j \in D_x(n)} \sum_{i \in D_y(n)} [Y_n(i, j) + b_n(j) - Y_{n-1}(i + d_x(n), j + d_x(n)) \\ &\quad - b_n(j + d_x(n))]^2 \\ &= \sum_{j \in D_x(n)} [\bar{Y}_n(j) + b_n(j) - \bar{Y}_{n-1}(j + d_x(n)) - b_n(j + d_x(n))]^2 \quad (6) \end{aligned}$$

$$\text{其中, } \bar{Y}_n(j) = \frac{1}{C_i} \sum_{i \in D_y(n)} Y_n(i, j), C_i = \begin{cases} 1, & i \in D_y(n) \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

$$i \in D_y(n), j \in D_x(n), 1 \leq i + d_x(n) \leq M, 1 \leq j + d_x(n) \leq N.$$

由第  $n$  帧和第  $(n-1)$  帧之间的配准,可以得到  $d_x(n)$ ,  $d_y(n)$ . 进而可以得到第  $j$  列和第  $j + d_x(n)$  列偏置参数之间的关系,即  $[b(j) - b(j + d_x(n))]$ ; 同理,通过第  $(n-1)$  帧和第  $(n-2)$  帧之间的配准,可以得到第  $j$  列和第  $j + d_x(n-1)$  列偏置参数之间的关系,即  $[b(j) - b(j + d_x(n-1))]$ , 经过  $\lambda_n$  帧以后,  $b(j)$  被关联起来,可以得到连通的  $b(j)$  ( $j = 1, \dots, N$ ), 由于相邻两帧之间运动的随机性,一般  $\lambda_n \leq 4$  即可满足. 根据式(6) 进而可以得到全局亮度均方误差函数

$$\begin{aligned} E_{(b, n)} &= \sum_{q=n-\lambda_n}^n E_b(q) = \sum_{q=n-\lambda_n}^n \sum_j E_b(j, q) \\ &= \sum_{q=n-\lambda_n}^n \sum_{j \in D_x(q)} [\bar{Y}_q(j) + b_q(j) - \bar{Y}_{q-1}(j + d_x(q)) \\ &\quad - b_q(j + d_x(q))]^2 \quad (7) \end{aligned}$$

通过求解最小化  $E_{(b, n)}$ , 得到  $E_{(b, n)}$  的全局最优解即为条纹非均匀性校正参数  $(b_1, b_2, \dots, b_N)$ .

$$\begin{aligned} \min E_{(b, n)} &= \sum_{q=n-\lambda_n}^n \sum_{j \in D_x(q)} [\bar{Y}_q(j) + b_q(j) - \bar{Y}_{q-1}(j + d_x(q)) \\ &\quad - b_q(j + d_x(q))]^2 \\ &= \sum_{q=n-\lambda_n}^n \sum_{j \in D_x(q)} \left[ \frac{1}{C_i} \sum_{i \in D_y(q)} Y_q(i, j) + b_q(j) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{C_i} \sum_{i \in D_y(q-1)} Y_{q-1}(i, j + d_x(q)) - b_q(j + d_x(q)) \right]^2 \quad (8) \end{aligned}$$

最小化  $E_{(b, n)}$ , 使得  $\partial E_b(j, n) / \partial b(j) = 0$ ,  $\partial E_b(j, n) / \partial b(j + d_x(n)) = 0$ , 得到

$$\begin{aligned}
 \sum_{q=n-\lambda_n}^n \sum_j \Delta b(j,q) &= \sum_{q=n-\lambda_n}^n \sum_j [b_q(j) - b_q(j+d_x(q))] \\
 &= \sum_{q=n-\lambda_n}^n \sum_j [\bar{Y}_q(j) - \bar{Y}_{q-1}(j+d_x(q))] \\
 &= \sum_{q=n-\lambda_n}^n \sum_j \left[ \frac{1}{C_i} \sum_{i \in D_y(q)} Y_q(i,j) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{C_i} \sum_{i \in D_y(q-1)} Y_{q-1}(i,j+d_x(q)) \right], \tag{9}
 \end{aligned}$$

其中,  $j = 1, \dots, N$ , 通过求解式(9), 求得最小化  $E_{(b,n)}$  的最优解, 得到非均匀性校正参数  $(b_1, b_2, \dots, b_N)$ .

### 3 实验结果与分析

为了验证文中算法对于条纹非均匀性的校正性能, 同时采用模拟条纹非均匀性和实际含有条纹非均匀性的红外视频序列. 原始红外视频序列见图 1; 原始红外视频序列加入均值为 0, 方差为 20 的模拟条纹非均匀性见图 2.

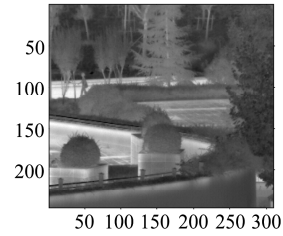


图 1 原始图像(第 7 帧)  
Fig. 1 Original image (Frame 7<sup>th</sup>)

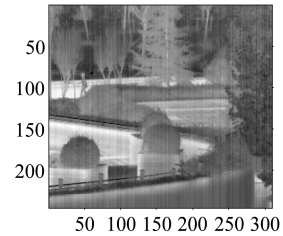


图 2 加入模拟条纹非均匀性图像  
Fig. 2 Image with simulated stripe NU

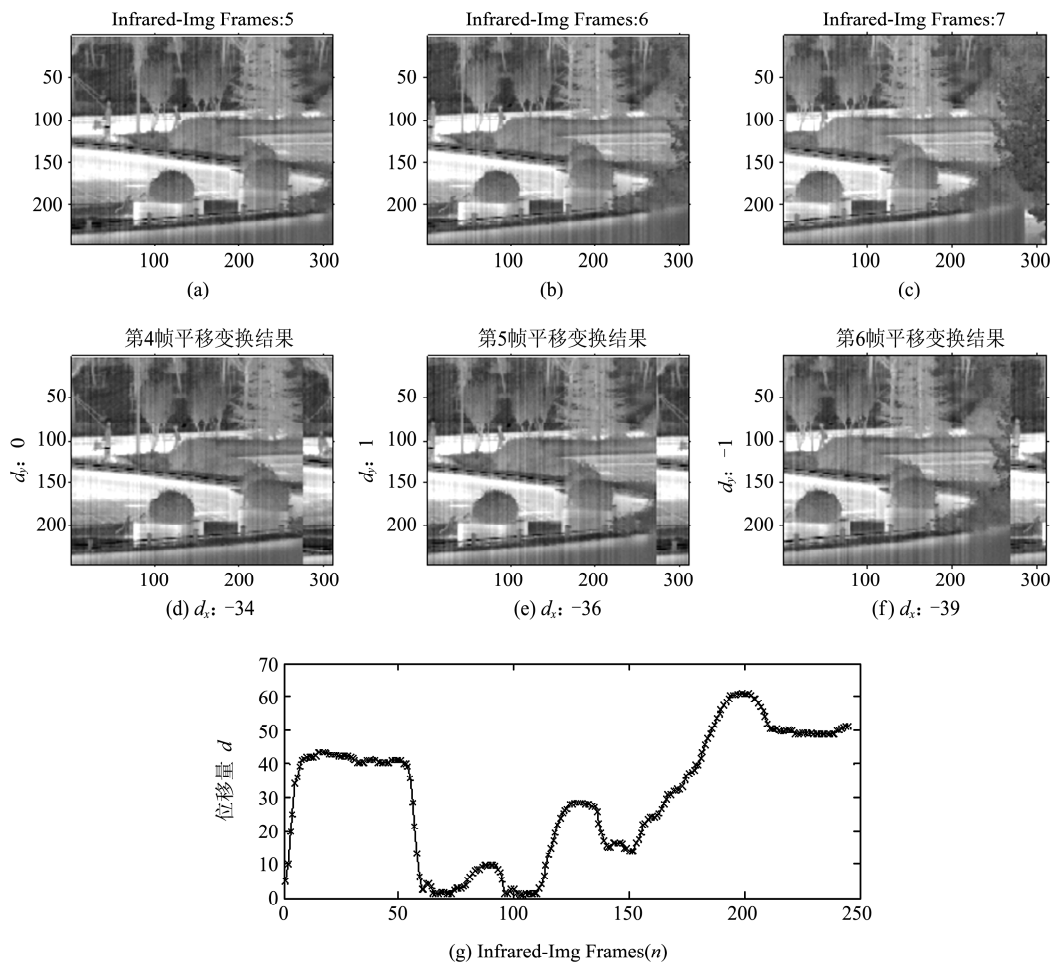


图 3 相邻帧配准结果及位移量  
Fig. 3 Results of inter-frame registration and displacement

针对加入的条纹非均匀性,同时使用本文算法和文献4及文献9算法,进行条纹非均匀性校正性能的比较.本文算法是基于相邻两帧之间的配准,采用基于梯度配准的方法,得到相邻两帧之间的运动估计,同时只考虑相邻两帧的相对位移量.图3所示为红外图像序列中三帧的配准结果,以及整个红外图像序列的相对位移量,位移量  $d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}$ .三种算法的校正结果见图4.

由图4可见,本文算法处理效果较好.但为了客观地评价处理后的图像质量,采用MSE (Mean Square Error)对图像进行评价.

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\hat{Y}(i,j) - Y(i,j)]^2}{M \times N}, \quad (10)$$

其中,  $Y(i,j)$  是原始均匀图像,  $\hat{Y}(i,j)$  是经过非均匀性校正后的图像.三种算法的MSE比较如图5所示.

由图4、图5可知,文中算法和文献4及文献9的算法对条纹非均匀性都有一定的处理效果,文献4算法是针对普通的非均匀性进行校正,用于条纹非均匀性校正有一定的效果,但收敛速度慢,计算量大;文献9算法是基于场景边缘梯度进行边缘分割处理,造成一些非均匀性的残留,随着场景的变化,严重影响算法校正效果;文中算法仅仅基于相邻两帧亮度恒定的假设,实验仿真在4帧之内达到很好的收敛效果,有效去除了条纹非均匀性.

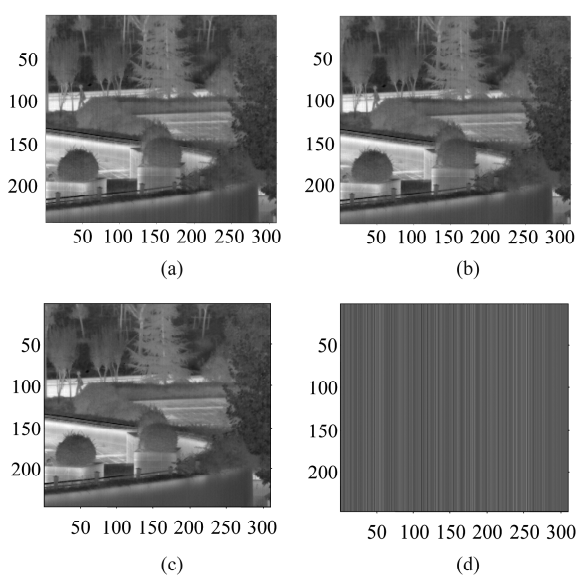


图4 三种算法处理结果 (a)文献4算法 (b)文献9算法 (c)文中算法 (d)本文算法估计出的非均匀性偏置

Fig.4 Results of three algorithms processed image (a) literature 4 (b) literature 9 (c) this paper (d) the estimated NU offset of this paper

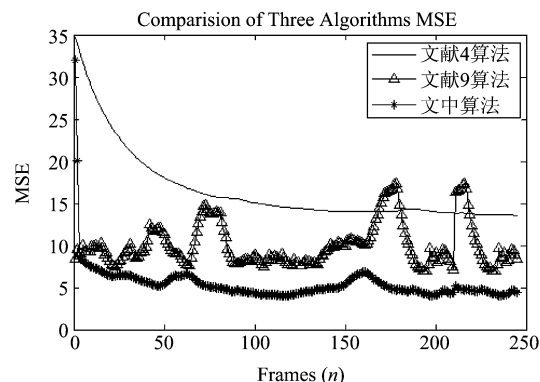


图5 三种算法的MSE对比图

Fig.5 Comparison of three algorithms MSE

下面采用实际的红外视频序列测试本文算法的条纹非均匀性校正性能.红外视频序列采用  $320 \times 256$  非制冷中波红外探测器 ( $3 - 5 \mu\text{m}$ ) 获得,分别采用文献9算法和文中算法对其进行校正,结果如图6所示.

由图6可见,文献9算法有残余非均匀性存在.通过以上仿真、验证分析,文中算法明显优于其它算法,有较好的条纹非均匀性校正效果.

## 4 结论

分析了条纹非均匀性在线扫红外焦平面阵列和

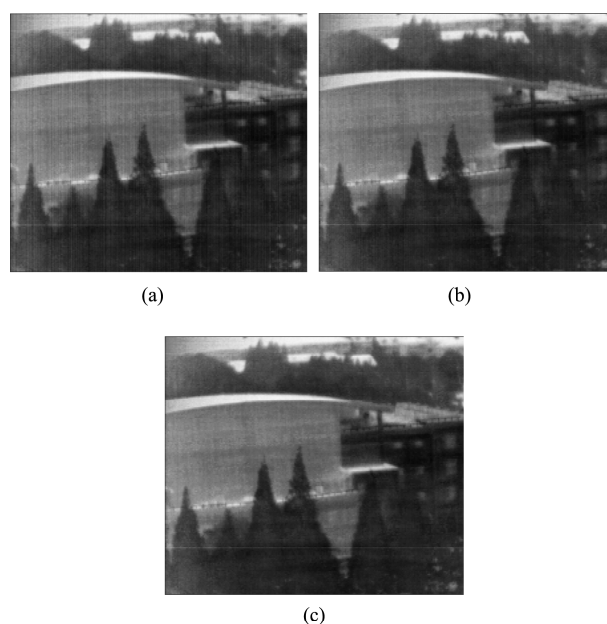


图6 实际图像序列处理结果 (a)实际图像序列 (15帧) (b)文献9算法处理结果 (c)文中算法处理结果

Fig.6 Results of processed real image sequence (a) real image sequence (frame 15<sup>th</sup>) (b) result of destriping algorithm of literature 9 (c) result of destriping algorithm of this paper

(下转 506 页)

的过程,将是下一步需要开展的研究内容.

### 3 结论

采用皮秒泵浦-探测方法对碲镉汞外延薄膜材料进行了研究,发现除了类似于一般的泵浦-探测实验在延迟时间零点附近探测光的差分透射强度出现饱和现象之外,经过饱和之后的探测光的差分透射强度迅速下降,达到一个数值为负的极小值,之后再增加并缓慢地恢复到接近于零.通过借鉴用于低温生长 GaAs 中的速率方程模型,并且引入两个深能级弛豫时间,对实验获得的差分透射强度随延迟时间的变化曲线进行了很好的拟合,提取到弛豫时间的数值,获得了弛豫时间随泵浦脉冲能量的变化关系,并且进行了定性的分析.由于碲镉汞材料自身的复杂性,例如可能同时存在汞空位、碲团聚和位错等多种缺陷,同时观测到的具有两种弛豫时间的深能级正是不同种类的缺陷的反映.同时采用光学手段的测量,研究的是对光激发敏感的缺陷,而把对光激发不敏感的缺陷的作用排除在外.因此,结果对于发展碲镉汞光电器件,特别是发展碲镉汞超快光电器件,以及对于深入理解碲镉汞材料中缺陷的行为

等将有一定的参考价值.

### REFERENCES

- [1] Rihani S, Faulks R, Beere H, *et al.* Effect of defect saturation on terahertz emission and detection properties of low temperature GaAs photoconductive switches [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2009, **95**(5):1106-1108.
- [2] Shah J. *Ultrafast spectroscopy of semiconductors and semiconductor nanostructures* [M]. Berlin ; New York : Springer Verlag, 1999:13.
- [3] Wintner E, Ippen E P. Nonlinear carrier dynamics in  $Ga_x In_{1-x}As_y P_{1-y}$  compounds [J]. *Appl. Phys. Lett.* 1984, **44**(10):999-1001.
- [4] Othonos A. Probing ultrafast carrier and phonon dynamics in semiconductors [J]. *J. Appl. Phys.* 1998, **83**(4):1789-1830.
- [5] Sosnowski T S, Norris T B, Wang H H, *et al.* High-carrier-density electron dynamics in low-temperature-grown GaAs [J]. *Appl. Phys. Lett.* 1997, **70**(24):3245-3247.
- [6] Zhang Y C, Pancholi A, Stolerua V G. Size-dependent radiative lifetime in vertically stacked (In, Ga) As quantum dot structures [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2007, **90**(18):3104-3106.
- [7] Lingk C, von Plessen G, Feldmann J. Dynamics of amplified spontaneous emission in InAs/GaAs quantum dots [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2000, **76**(24):3507-3509.
- [1] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint [J]. *IEEE Trans. Image Proc.* 1999, **8**(8):1148-1151.
- [2] Scribner D A, Sarkady K A, Caulfield J T, *et al.* Adaptive retina-like preprocessing for imaging detector arrays [J]. *Proc. IEEE.* ,1993, **3**:1955-1960.
- [3] Scribner D A, Sarkady K A, Caulfield J T. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques [J]. *Proc. SPIE.* 1990, **1308**:224-233.
- [4] Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E E, *et al.* Scene-based nonuniformity correction using video sequences and registration [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(8):1241-1250.
- [5] Hardie R C, Baxley F, Brys B, *et al.* Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm [J]. *Optics Express.* 2009, **17**(17):14918-14933.
- [6] Vera E, Meza P, Torres S. Total variation approach for adaptive nonuniformity correction in focal-plane arrays [J]. *Optics Letters.* 2011, **36**(2):172-174.
- [7] Shen H, Ai T, Li P. Destriping and inpainting of remote sensing images using maximum a-posteriori method [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, 2008, **XXXVII**(B1):63-70.
- [8] Yang Z, Li J, Menzel W P, *et al.* De-striping for MODIS data via wavelet shrinkage [J]. *Proc. SPIE.* 2003, **4895**:187-199.
- [9] Qian W X, Chen Q, Gu G H, *et al.* Correction method for stripe nonuniformity [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(10):1764-1773.
- [10] Irani M, Peleg S. Improving resolution by image registration [J]. *CVGIP: Graph Models Image Process.* 1991, **53**(3):231-239.
- [11] Hardie R C, Barnard K J, Bognar J G, *et al.* High resolution image reconstruction from a sequence of rotated and translated frames and its application to an infrared imaging system [J]. *Optical Engineering*, 1998, **37**:247-260.
- [12] Chen J S, Shao Y, Guo H D, *et al.* Destriping CMODIS data by power filtering [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* ,2003, **41**(9):2119-2114.

(上接 502 页)

非制冷凝视红外焦平面阵列成像系统中产生的原因,基于亮度恒定假设,通过相邻两帧之间的配准,建立了条纹非均匀性校正的模型.通过模拟条纹非均匀性和实际红外图像序列仿真,验证了文中算法的校正效果.实验结果表明,文中算法能够在几帧内达到较好的收敛,有效提高了条纹非均匀性的校正效果,具有较强的实用价值.

### REFERENCES