

文章编号:1001-9014(2005)04-0255-06

# 红外焦平面非均匀性噪声的空间频率特性 及空间自适应非均匀性校正方法改进

张天序<sup>1,2</sup>, 石岩<sup>1,2</sup>, 曹治国<sup>1,2</sup>

(1. 华中科技大学 图像识别与人工智能研究所, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**分析了红外焦平面阵列非均匀性噪声的空间频率特性,指出空间低频噪声为其中的主要成分.利用实际 IRFPA 定标数据,也得出了相同结论.针对传统空域自适应校正方法去除低频空间噪声存在的不足,本文提出采用一点校正和空域自适应校正相结合的方法.实验结果表明,新方法在空间低频噪声占优时能获得好的校正效果.

**关键词:**红外焦平面阵列;非均匀性校正;自适应;空间频率

**中图分类号:**TN215 **文献标识码:**A

## STUDY ON THE PROPERTY OF SPATIAL FREQUENCY OF NON-UNIFORMITY NOISE IN IRFPA AND THE IMPROVEMENT OF SPATIAL ADAPTIVE NONUNIFORMITY CORRECTION TECHNIQUE

ZHANG Tian-Xu<sup>1,2</sup>, SHI Yan<sup>1,2</sup>, CAO Zhi-Guo<sup>1,2</sup>

(1. Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, HUST, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory for Image Processing and Intelligent Control, HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The property of spatial frequency of the nonuniformity noise in IRFPA was studied. And the conclusion is that low frequency noise generally dominates the inherent IRFPA nonuniformity noise. The experiment with real IRFPA data demonstrates the same conclusion. To avoid the disadvantage of the traditional spatial adaptive nonuniformity correction denoising the low frequency dominated nonuniformity noise, a feasible approach for nonuniformity correction of IRFPA, which integrates one-point correction with spatial adaptive correction scheme, was proposed in this study. Experiments show that the proposed scheme can achieve good performance when low frequency noise is dominant.

**Key words:** IRFPA; nonuniformity correction; adaptive; spatial frequency

### 引言

凝视型红外焦平面(IRFPA)成像性能受非均匀性噪声影响严重,实际应用中必须进行非均匀性校正<sup>[1]</sup>.目前国内外的IRFPA非均匀性校正方法包括基于标定的方法和基于场景方法(也称为自适应校正方法)两大类.其中以神经网络计算为核心的非均匀性校正法<sup>[1,2]</sup>(NN-NUC),利用场景中相邻像素的空间相关性实现非均匀性校正,是基于场景校正方法中空域处理的典型代表,也是较为经典的自适

应校正方法.但是NN-NUC方法基于一个前提,即假设由响应非均匀性引起的IRFPA空间噪声其空间频率主要是高频或是白噪声.而针对实际IRFPA的非均匀性噪声,该假设可能并不成立.因此面临的如果是低频占优的空间噪声,NN-NUC方法则无法达到好的校正效果.

本文从IRFPA探测元的响应模型入手,分析了非均匀性噪声的空间频率特性,指出噪声的主要成分在很大程度上是低频成分.对实际IRFPA定标数据的分析,也证明了相同的结论.针对这种低频占优

收稿日期:2004-08-19,修回日期:2005-01-22

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(60135020)

作者简介:张天序(1947-),男,重庆人,博士,教授,主要研究方向为图像分析与智能系统、机器视觉、医学图像处理、实时并行处理等.

Received date: 2004-08-19, revised date: 2005-01-22

的空间噪声,本文提出了将标定方法中的一点校正法与传统 NN-NUC 方法相结合的 One-P & NN-NUC 方法,从而获得了较好的校正效果。

## 1 IRFPA 探测单元响应模型及空间噪声的频率特性分析

文中探测器响应模型采用 Mooney 理想响应模型<sup>[3]</sup>,模型中忽略时域噪声的影响.对绝对温度  $T$  的黑体辐射,IRFPA 中像元的在一个有效积分周期内响应的全部电荷数  $N_i(T)$ :

$$N_i(T) = [\tau_{\text{eff}}\tau_{\text{int}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_i(\lambda)L(\lambda,T)d\lambda]A_i\Omega_i + D_i, \quad (1)$$

$$\Omega_i = \left[ \frac{\pi \cos^4 \theta_i}{4(F/\#)^2 + 1} \right]. \quad (1)$$

表 1 给出了式 1 中所涉及的各变量的含义以及是否与探测元空间坐标有关(有关则造成非均匀性,产生空间噪声)。

为简化起见得到线性响应模型,假定  $\eta_i(\lambda)$  与  $L(\lambda,T)$  无关且都是波长  $\lambda$  的连续函数,则根据定积分中值定理,存在  $\lambda_c \in [\lambda_1, \lambda_2]$ ,使得式(2)成立

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_i(\lambda)L(\lambda,T)d\lambda = \eta_i(\lambda_c) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda,T)d\lambda. \quad (2)$$

由式(1)与式(2)可得

$$N_i(T) = \left[ \tau_{\text{eff}}\tau_{\text{int}}\eta_i(\lambda_c) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda,T)d\lambda \right] A_i\Omega_i + D_i$$

$$= \frac{\tau_{\text{int}}\eta_i(\lambda_c)A_i\Omega_i}{\langle A_i \rangle \langle \Omega_i \rangle} \left[ \tau_{\text{eff}} \langle A_i \rangle \langle \Omega_i \rangle \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda,T)d\lambda \right] + D_i$$

$$= G_i \cdot \Phi + O_i. \quad (3)$$

式(3)中,  $\langle A_i \rangle$  和  $\langle \Omega_i \rangle$  分别表示 IRFPA 所有像元空间平均光敏面积和平均立体角,  $\Phi = \tau_{\text{eff}} \langle A_i \rangle \langle \Omega_i \rangle \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda,T)d\lambda$  为绝对温度  $T$  的黑体辐射到 IRFPA 各探测元的平均光通量,而  $O_i = D_i$  和  $G_i = \frac{\tau_{\text{int}}\eta_i(\lambda_c)A_i\Omega_i}{\langle A_i \rangle \langle \Omega_i \rangle}$  分别为探测元  $i$  的偏移系数和增益系数,此即探测元的线性响应模型。

根据式(3)所表示的线性响应模型及表 1 可知,最终导致 IRFPA 各探测元响应非均匀性的因素包括 4 个方面:光敏面积  $A_i$ 、立体角  $\Omega_i$ 、量子效率  $\eta_i(\lambda)$  和暗电流累积电荷  $D_i$ . 当成像系统的光学视场较小时,可近似认为所有探测元的  $\cos^4 \theta_i$  因子等于 1,从而忽略不同探测元的立体角  $\Omega_i$  的差异.光敏面

表 1 Mooney 响应模型中变量的含义及是否与空间坐标相关

Table 1 Variables in Mooney's IR sensor model and the relationship with spatial location

变量	定义	是否与空间坐标 $i$ 有关
$\tau_{\text{eff}}$	光学系统的透射率(忽略了波长的影响)	无关
$\tau_{\text{int}}$	IRFPA 的积分时间	无关
$[\lambda_1, \lambda_2]$	光学系统的光谱响应的波长范围	无关
$\eta_i(\lambda)$	像元 $i$ 的量子效率	有关
$L(\lambda, T)$	绝对温度为 $T$ 的黑体在波长 $\lambda$ 处的光谱辐照亮度,由 Planck 辐射定律计算	无关
$\theta_i$	像元 $i$ 相对于光学系统中心轴的偏移角	有关
$\Omega_i$	像元 $i$ 相对于光学系统出瞳的立体角	有关
$F/\#$	光学系统的 $f$ 数	无关
$A_i$	像元 $i$ 的几何光敏面积	有关
$D_i$	像元 $i$ 的暗电流在积分时间内所累积的电荷数	有关

积  $A_i$  的均匀性由光刻技术决定,而探测元的量子效率  $\eta_i(\lambda)$  和暗电流累积电荷  $D_i$  则与多个 IRFPA 制作工艺以及工作温度等多个因素有关.以 MCT ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  探测元,  $x$  表示组成比)为例,影响这 2 个参数的因素<sup>[4-6]</sup>如表 2 所列。

表 2 中的禁带宽度由工作温度和组成比  $x$  所决定<sup>[4,6]</sup>.根据常用的制冷方式(如 J-T 制冷器)和晶体制作工艺(液/气相外延法)可知,在上述各种因素中如各探测元的工作温度、组成比  $x$ 、本征载流子、施主和受主浓度等因素,在整个 IRFPA 范围内空间上是缓变的,在空间频率上主要是低频成分;而光敏面积  $A_i$  参数其非均匀性特征由光刻工艺决定,其主要的空间频率不能简单认为是低频成分。

根据上述的理论分析,可以得到如下关于探测元线性响应模型式(3)响应系数的分布以及非均匀性引起的空间噪声的特点:由于决定响应系数的多数因素在空间上呈缓慢变化,因此式(3)中的偏移系数  $O_i$  和增益系数  $G_i$  在空间上也是缓变的,这使得由响应非均匀性引起的空间噪声其空间频率的主要成分不是高频而是低频。

表 2 HgCdTe 探测器影响量子效率和暗电流的因素

Table 2 Factors determining the quantum efficiency and the dark charge of HgCdTe IRFPA

参数	影响因素
$\eta_i(\lambda)$	包括探测元 p-n 结偏置电压、n 区的厚度、工作温度、晶体缺陷和禁带宽度等。
$D_i$	包括探测元的工作温度、p-n 结面积,本征载流子、施主和受主浓度,以及禁带宽度等。

## 2 真实 IRFPA 空间噪声的频率特性

通常条件下,要单独测得各探测元在某个工作范围内的响应系数  $G_i$  和  $O_i$  是困难的. 但可以对 IRFPA 在该工作范围内定标, 利用定标数据分析非均匀性噪声的空间频率特性. 即用高/低温定标源照射 IRFPA 所有的  $M$  个探测元, 得到高/低温定标数据  $N_i^H$  和  $N_i^L$ :

$$\begin{cases} N_i^H = G_i \cdot \Phi^H + O_i, \\ N_i^L = G_i \cdot \Phi^L + O_i. \end{cases} \quad (i=1, \dots, M) \quad (4)$$

其中,  $\Phi^H$  和  $\Phi^L$  分别为高/低温定标时均匀辐照的光通量. 对于定标数据, 其期望的校正输出一般都采用其空间均值, 则高/低温定标时由响应非均匀性引起的空间噪声为

$$\begin{cases} N_i^H - \langle N_i^H \rangle = (G_i - \langle G_i \rangle) \cdot \Phi^H + (O_i - \langle O_i \rangle), \\ N_i^L - \langle N_i^L \rangle = (G_i - \langle G_i \rangle) \cdot \Phi^L + (O_i - \langle O_i \rangle). \end{cases} \quad (i=1, \dots, M) \quad (5)$$

其中  $\langle \cdot \rangle$  表示空间平均. 由式(5)可知在输入光通量变化为  $\Phi^H - \Phi^L$  时由于探测元增益非均匀性所导致的空间噪声为

$$\begin{aligned} & (N_i^H - \langle N_i^H \rangle) - (N_i^L - \langle N_i^L \rangle) \\ &= (G_i - \langle G_i \rangle) \cdot (\Phi^H - \Phi^L). \quad (i=1, \dots, M) \end{aligned} \quad (6)$$

需要说明的是, 式(4) ~ 式(6)中只有  $N_i^L$ 、 $N_i^H$  以及  $\langle N_i^L \rangle$ 、 $\langle N_i^H \rangle$  是可以通过定标过程得到的. 当然对于分析增益的空间分布以及非均匀性噪声的空间频率特性, 这些信息已经足够.

图 1(a) 和图 1(b) 分别为对某个  $128 \times 128$  大小、采样精度为 14bit 的长波 IRFPA 在定标黑体温度  $T_B = 312K$  和  $T_B = 298K$  时测得的实际数据, 根据

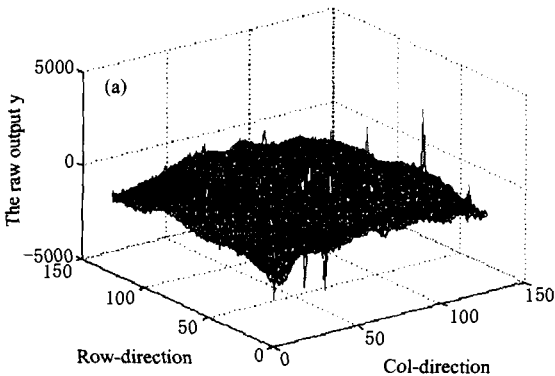


图 1 (a)  $T_B = 312K$  时 IRFPA 的空间噪声  
Fig. 1 (a) 3-Dimensional representation of the spatial noise when  $T_B = 312K$

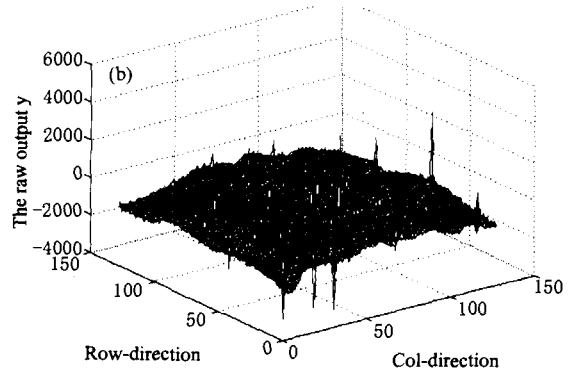


图 1 (b)  $T_B = 298K$  时 IRFPA 的空间噪声  
Fig. 1 (b) 3-Dimensional representation of the spatial noise when  $T_B = 298K$

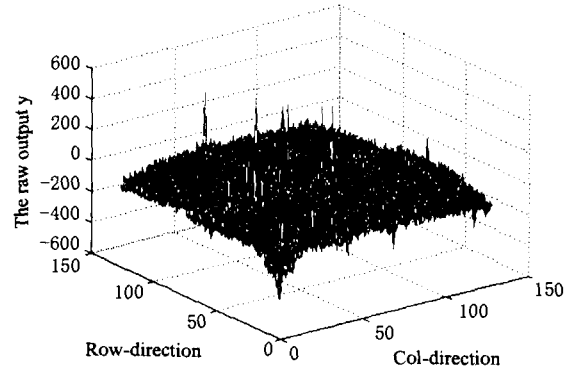


图 2 由增益非均匀性所导致的空间噪声  
Fig. 2 3-Dimensional representation of the spatial noise which only caused by the gain nonuniformity

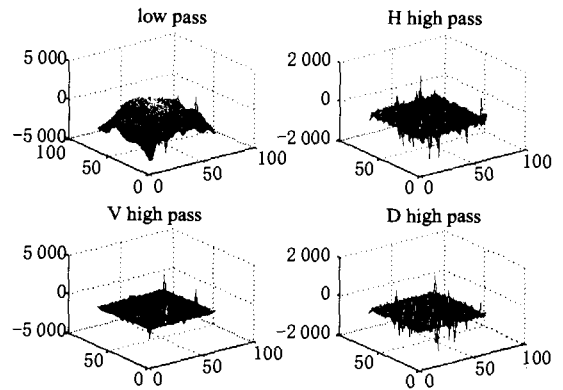


图 3  $T_B = 312K$  时 IRFPA 的空间噪声一级小波分解后各子带的系数  
Fig. 3 3-Dimensional representation of the spatial noise after wavelet decomposition when  $T_B = 312K$

式(5)计算得到的空间噪声, 由式(6)得到的因增益非均匀性所导致的空间噪声如图 2 所示.

由图 1(a) 和图 1(b) 可以看出 IRFPA 所受到的

空间噪声呈现出明显缓慢起伏,即噪声的空间频率主要为低频成分;而图 2 中所示的由增益非均匀性所导致的空间噪声,相对图 1 而言其低频成分有较大降低. 为定量分析非均匀性噪声的空间频率分布,对上述噪声图像数据进行一级小波分解,得到 4 个子带的小波系数图像如图 3 所示(只给出了图 1(a)的小波分解各子带图,另外 2 个略去). 左上角子带图像为噪声的低频成分,其他 3 个子带为噪声的高频成分,由此计算噪声的高频成分的能量占总噪声能量的比例.

上述 3 种情况下 IRFPA 空间噪声的高频成分在总噪声能量所占的比例如表 3 所列.

根据图 1 ~ 图 3 和表 3,可以得出 2 个关于该 IRFPA 所受空间噪声的空间分布性质:

性质一: 由非均匀性引起的空间噪声其主要空间频率的是低频成分.

性质二: 由增益非均匀性单独导致的空间噪声,其空间高频部分所占比例有较大增加.

然而传统的 NN-NUC 方法的前提假设是:非均匀性所导致的空间噪声,其空间频率主要是高频或是白噪声<sup>[1]</sup>. 正是基于该前提,NN-NUC 采用像元的邻域输出均值作为该像元输出的校正期望值来更新校正系数,使其呈空间低通的频率特征. 因此当实际 IRFPA 空间噪声是低频占优时,NN-NUC 是无法消除频率较低的空间噪声,文献[5]中也有类似结论. 不过根据性质二,预先采用某种简单的校正使得剩余的空间噪声只剩下由增益非均匀性所导致的部分,然后再采用 NN-NUC 的思想进行后续校正,将得到较好的效果. 这种预先的校正方法实际上就是一点校正法,因此将整个方法称为一点法与 NN-NUC 相结合的非均匀性校正方法(简称为 One-P & NN NUC 方法).

### 3 一点法与神经网络法相结合的 IRFPA 非均匀性校正

一点法与神经网络法相结合的 IRFPA 非均匀

表 3 空间高频噪声在总的空间噪声中所占比例  
Table 3 The ratio of the high frequency noise to the total spatial noise

类别	空间高频噪声在总的空间噪声中的比例 (%)
$T_B = 312K$	4.21
$T_B = 298K$	5.63
由增益非均匀性所导致的空间噪声	30.1

性校正算法框图如图 4 所示. 图中虚线框外部分为一点法校正处理,虚线框内部分为以神经网络计算为核心的增益校正处理. 图中的  $N_{ij}(\Phi^0)$  为某一定标点(输入光通量为  $\Phi^0$ ) 像元  $(i, j)$  的输出,  $\langle N_{ij}(\Phi^0) \rangle$  为该定标点的空间平均输出(即一点法校正输出值).

根据式(3)表示的线性响应模型,图 4 中  $x_{ij}(\Phi)$  为

$$x_{ij}(\Phi) = N_{ij}(\Phi) - N_{ij}(\Phi^0) = G_{ij} \cdot (\Phi - \Phi^0). \tag{7}$$

即  $x_{ij}(\Phi)$  只与探测元的增益系数有关,  $x_{ij}(\Phi)$  受到的空间噪声仅由增益非均匀性导致. 根据上节所述的性质二,  $x_{ij}(\Phi)$  受到的空间噪声其高频成分已占较大比例. 因此,对  $x_{ij}(\Phi)$  再利用神经网络法进行增益校正,将能获得好的校正效果. 图 4 中虚线部分即采用神经网络校正法原理对增益系数进行校正. 校正系数  $a_{ij}$  的迭代更新公式为

$$a_{ij}^{n+1} = a_{ij}^n - 2\mu \cdot x_{ij}^n (y_{ij}^n - f_{ij}^n). \tag{8}$$

其中  $\mu$  为迭代步长,  $f_{ij}^n$  为像元  $(i, j)$  的 4 邻域均值(期望校正). 最终校正输出  $S_{ij}^n(\Phi)$  为

$$\begin{aligned} S_{ij}^n(\Phi) &= y_{ij}^n(\Phi) + \langle N_{ij}^n(\Phi^0) \rangle \\ &= a_{ij}^n \cdot G_{ij}(\Phi - \Phi^0) + \langle G_{ij} \rangle \cdot \Phi^0 + \langle O_{ij} \rangle. \end{aligned} \tag{9}$$

如果增益校正系数  $a_{ij}^n$  迭代后收敛于  $\langle G_{ij} \rangle / G_{ij}$ , 则根据式(9)One-P & NN NUC 方法得到的输出  $S_{ij}^n(\Phi)$  与输入光通量  $\Phi$  的关系表达式为

$$\begin{aligned} S_{ij}^n(\Phi) &= (\langle G_{ij} \rangle / G_{ij}) \cdot G_{ij}(\Phi - \Phi^0) \\ &\quad + \langle G_{ij} \rangle \cdot \Phi^0 + \langle O_{ij} \rangle \\ &= \langle G_{ij} \rangle \cdot \Phi + \langle O_{ij} \rangle. \end{aligned} \tag{10}$$

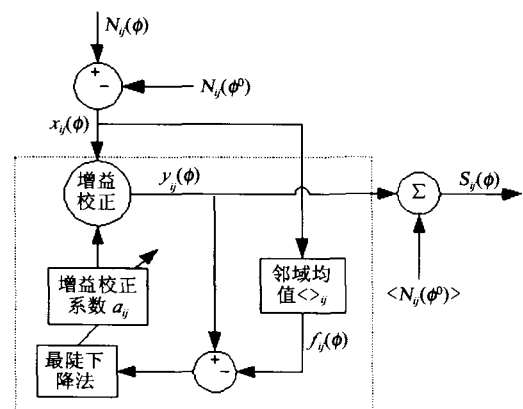


图 4 One-P & NN NUC 方法框图  
Fig. 4 Graphic description of the One-P & NN NUC scheme

最终校正输出  $S_{ij}^n(\Phi)$  则只与输入光通量有关,而与像元  $(i, j)$  空间位置无关,因此由非均匀性导致的空间噪声被完全消除. 当然,实际迭代过程中  $a_{ij}^n$  并非如上所述进行更新. 假设像元  $(i, j)$  辐照到的光通量约为 4 邻域上光通量的空间均值(即认为外部景物产生的输入光通量在 IRFPA 上是空间渐变的),则在 One-P & NN NUC 方法中  $a_{ij}^n$  实际上是以  $\langle G_{ij} \rangle_{4\text{邻域}}/G_{ij}$  为期望值进行更新的,其中  $\langle G_{ij} \rangle_{4\text{邻域}}$  为像元  $(i, j)$  增益系数  $G_{ij}$  的 4 邻域均值.

在实际应用中,对 IRFPA 进行一点定标获得方法中所需的  $N_{ij}(\Phi^0)$  和  $\langle N_{ij}(\Phi^0) \rangle$  是比较容易的. 简单办法就是盖上成像器镜头,使输入光通量对各像元相同,从而得到所需参数.

### 4 实验与讨论

为说明当 IRFPA 空间噪声低频占优时 NN-NUC 方法存在的不足,以及本文提出的 One-P & NN NUC 方法的性能,本节采用了从实际  $128 \times 128$  规格 LW MCT IRFPA 所采集到的 650 帧序列图像. 景象内容为室内均匀背景下的拿着手机的人手. 序列中第 588 帧到第 600 帧因人手移出视场,图像中只有背景. 对此 13 帧平均得到一点法定标图像(如图 5 所示),获得  $N_{ij}(\Phi^0)$  和  $\langle N_{ij}(\Phi^0) \rangle$ . 其他参数取值为:  $\mu = 2e - 4, a_{ij}^0 = 1, b_{ij}^0 = 0$ . 迭代步长根据文献[7]的分析进行合理选择,保证算法能尽快收敛.

图 6 ~ 图 8 分别显示了序列中的第 50、100、320、500 和 630 帧的原始图像、NN-NUC 校正后的结果和 One-P & NN NUC 法校正后的结果. 其中 a ~ e 分别表示第 50、100、320、500 和 630 帧.

从图 5 可以看出,对于均匀背景 IRFPA 所成的图像中间亮四周暗,并存在带状暗区,低频空间噪声占很大比例. 传统 NN-NUC 方法即使在输入 500 多帧图像后,仍无法消除这些暗区(如图 7 (d)、7 (e)),这与第二节的分析是吻合的. 而 One-P & NN NUC 法取得了良好的校正效果. 具体表现在:一是辐射度相近的区域(如手、背景和手机)内部的噪声都得到了较好的抑制,二是图像特征(包括边缘等特征)得到了较好的保持,如图 8 所示.



图 5 均匀背景辐照时获取的图像序列的时间平均值  
Fig. 5 The temporal average of the serial when IRFPA was uniformly irradiated by background

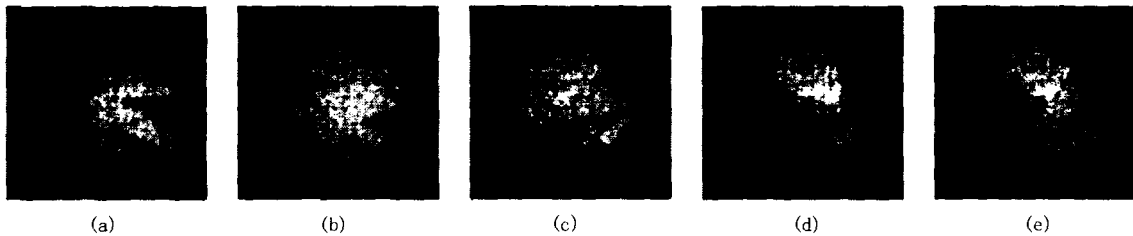


图 6 原始图像序列 (a) 第 50 帧 (b) 第 100 帧 (c) 第 320 帧 (d) 第 500 帧 (e) 第 630 帧  
Fig. 6 Original images (a) 50 th (b) 100 th (c) 320 th (d) 500 th (e) 630 th frame

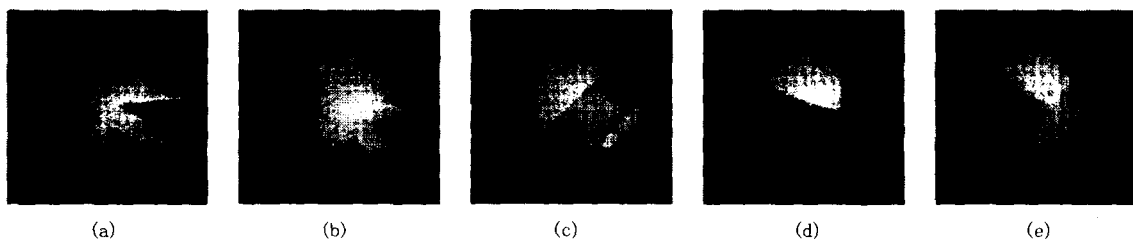


图 7 NN-NUC 法校正后的图像序列 (a) 第 50 帧 (b) 第 100 帧 (c) 第 320 帧 (d) 第 500 帧 (e) 第 630 帧  
Fig. 7 Corrected images after NN-NUC (a) 50 th (b) 100 th (c) 320 th (d) 500 th (e) 630 th frame

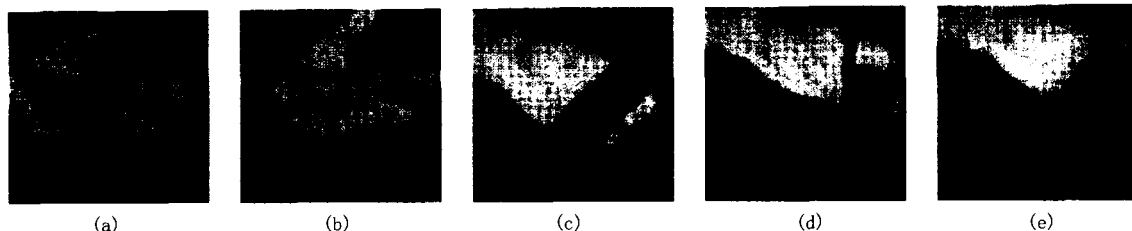


图8 One-P & NN-NUC 法校正后的图像序列 (a) 第 50 帧 (b) 第 100 帧 (c) 第 320 帧 (d) 第 500 帧 (e) 第 630 帧

Fig. 8 Corrected images after One-P & NN-NUC (a) 50 th (b) 100 th (c) 320 th (d) 500 th (e) 630 th frame

为了从客观上对校正方法的校正性能进行定量分析,设计合理的评价指标也是值得探讨的问题.目前针对实际 IRFPA 图像序列,当无法获知其原始信号(或理想校正系数)时,采用的是校正后图像的粗糙度<sup>[9]</sup>(roughness)或是  $3 \times 3$  邻域内标准差的空间平均值<sup>[1]</sup>,来衡量剩余非均匀性.但存在 2 个问题:一是对图像灰度值进行线性变换(如将灰度拉伸/压缩到  $[0, 255]$ )时,尽管图像信息没有任何改变,但这 2 个指标都会改变.二是没有考虑区域的真正边缘,将区域边缘部分的有用高频信息也算成了非均匀性噪声.针对这些问题,根据实际应用需要本文采用了对比度指标  $C$  来衡量各种方法的校正性能.具体定义如下:

$$C = \frac{abs(\langle g \rangle_1 - \langle g \rangle_2)}{(size_1 \cdot std(g)_1 + size_2 \cdot std(g)_2) / (size_1 + size_2)} \quad (11)$$

其中  $\langle g \rangle_i$ ,  $size_i$  和  $std(g)_i$  分别为区域  $i$  ( $i = 1, 2$ ) 的灰度均值、面积和灰度标准差.而不同的区域,则是通过人工划分出来的.对比度  $C$  越高,则认为校正效果越好.图 6 ~ 图 8 的对比度如表 4 所列.在表 4 中,第 50 和 100 帧其对比度为手/背景,第 320、500 和 630 帧图像存在手、手机和背景,其对比度数组为:(手/背景,手/手机,手机/背景).

## 5 结语

本文从红外焦平面阵列非均匀性噪声的产生机

理入手,指出空间低频噪声为其中的主要成分.针对传统空域自适应校正方法去除低频占优的空间噪声所存在的不足,本文提出采用一点校正和空域自适应校正相结合的方法.实验结果表明,新方法在空间低频噪声占优时能获得好的校正效果.

## REFERENCES

- [1] Scribner D A, Sarkady K A, Caulfield J T, et al. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques [C]. *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays*, SPIE, 1990, **1308**:224—233.
- [2] Scribner D A, Sarkady K A, Krueer M R, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks [C]. *Infrared Sensors, Detectors, Electronics, and Signal Processing*, SPIE, 1991, **1541**:100—109.
- [3] Mooney J M, Shepherd F D, Ewing W S, et al. Responsivity nonuniformity limited performance of infrared staring cameras [J]. *Optical Engineering*, 1989, **28** (11): 1151—1161.
- [4] LIU Hui-Tong, WANG Qi, ZHENG Zhi-Wei, et al. Analysis and calculation of the nonlinear response in infrared focal plane arrays [J]. *Journal of Infrared Millimeter Wave* (刘会通,王琪,郑志伟,等.红外焦平面阵列非线性响应的分析和计算. *红外与毫米波学报*), 2001, **20**(4): 253—258.
- [5] SHI Yan, ZHANG Tian-Xu, LI Mui, et al. New approach to nonuniformity correction of IRFPA with nonlinear response [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (石岩,张天序,李辉,等.一种考虑红外焦平面四件非线性响应的非均匀性校正方法. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(4): 251—256.
- [6] YE Zhen-Hua, WU Jun, HU Xiao-Ning, et al. Study of integrated MW1/MW2 two-color HgCdTe infrared detector arrays [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华,吴俊,胡晓宁,等.集成式 HgCdTe 红外双色探测器阵列. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(3): 193—196.
- [7] CAO Zhi-Guo. Study on some key techniques for information processing system in IR imaging guidance [D]. Ph. D thesis of Huazhong University of Science and Technology (曹治国.红外成像制导信息处理系统的若干关键技术研究.华中科技大学博士学位论文), 2001.
- [8] Hayat Majeed M, Torres Sergio N, Armstrong Ernest, et al. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(8) 772—780.

表 4 图 6 ~ 图 8 中区域之间的对比度

Table 4 Contrasts of different regions in Fig. 6 to Fig. 8

帧号	原始图像	NN-NUC 校正后	One-P & NN NUC 校正后
50	1.73	1.790	7.032
100	1.831	1.982	6.330
320	(1.558, 0.434, 2.342)	(1.738, 0.338, 2.503)	(8.496, 3.077, 5.463)
500	(1.066, 0.030, 1.221)	(1.136, 0.061, 1.401)	(8.626, 3.514, 4.273)
630	(1.152, 0.359, 1.652)	(1.086, 0.376, 1.649)	(8.335, 3.663, 4.922)