

doi: 10. 3788/gzxb20134204. 0486

一种积分时间自适应调整的非均匀性校正算法

李晶, 朱斌, 郭立新, 汤磊, 曹晓荷

(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要:提出一种实时校正方法,在非均匀性校正的过程中根据当前场景信息自适应调整积分时间.首先获取不同积分时间下的背景噪音并进行存储,根据特定的阈值控制积分时间的切换;进而将探测器输出减去相应积分时间下的背景噪音后作为神经网络的输入,从而不断地更新校正参量.这样既能有效弥补神经网络校正算法在低频噪音占优时的不足,降低由于积分时间改变引起的非均匀性,又能够补偿系统的温漂.对真实的红外图像序列实验表明,文中提出的算法在积分时间切换的同时可以得到合适的校正参量,并保证校正后的图像质量,能够实现实时校正.

关键词:红外焦平面;神经网络;积分时间

中图分类号:TN215

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)04-0486-5

A Method of Non-uniformity Correction Based on Adaptively Adjusting Integration Time

LI Jing, ZHU Bin, GUO Li-xin, TANG Lei, CAO Xiao-he

(South West Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The real-time correction algorithm is proposed, which adjusts the integration time adaptively according to the current scene information in the process of correction. Firstly, the background images are stored at different integration time and the integration time is adjusted by the specific thresholds. Then the corresponding background image is subtracted from the output of IRPPA and the result are taken as the input of neural network. So it can make up the deficiency of neural network, and reduce the non-uniformity caused by the change of integration time. Experiments of real IRFPA videos show that the proposed algorithm insures high quality of image, also has the advantages of integration time adjusting adaptively and real-time correction.

Key words: Infrared focal plane arrays; Neural network; Integration time

0 引言

由于体积小、结构紧凑、作用距离远、抗干扰性好及可全天候和全天时工作等优点,红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Arrays, IRFPA)已成为红外成像技术的发展趋势.但由于制造工艺的限制,IRFPA存在大量非均匀性而且成像的动态范围小.动态范围表征了红外系统可探测红外辐射大小的范围.在较宽的动态范围下,可以获得更多的目标信息,有利于对目标的分析和识别.目前IRFPA成像系统动态范围的加宽主要是通过调节积分时间的方法来实现的,但是随着积分时间的改变非均匀性又

会重新产生,校正参量将不再适用.因此,在红外成像系统非均匀性校正的过程中能够实现自适应积分时间调节同时又不影响校正后的图像质量,对工程应用有重要的意义.文献[1]结合两点校正算法提出了一种积分时间自适应切换的方法,通过存储12组校正参量,利用LMS滤波及场景的反馈量不断实现积分时间的自适应调整,但是这种方法需要多次的积分时间调整才能达到合适的状态,不利于实时处理.文献[2]给出了更为直接的基于定标的积分时间调整方法,通过黑体标定实验获得每个积分时间下的校正参量并进行存储,在校正的过程中根据设定的阈值来选择合适的校正参量来实现积分时间的

第一作者:李晶(1986-),女,硕士研究生,主要研究方向为红外图像信号处理. Email:jinglilee@yahoo.com.cn

责任作者/导师:朱斌(1962-),男,研究员,主要研究方向为红外光电系统. Email:wwzhzhcc@sina.com.cn

收稿日期:2012-08-16;录用日期:2013-01-21

切换.文献[3]提出的超帧技术能够有效提高动态范围,但实时性低.而对于自适应非均匀性校正算法中结合积分时间自适应切换的研究却很少.

本文采用神经网络校正算法,在校正的过程中,自适应的切换积分时间.基本思想是:设定合理的阈值划分积分时间,并存储不同积分时间下的背景图像,将探测器的原始输出减去相应积分时间下的背景图像作为神经网络的输入.这样不仅可以避免神经网络校正算法在低频噪音占优时的不足,而且能够实现积分时间的自适应切换,仿真结果表明,在积分时间切换的临界点,也能够保证图像的校正质量.

1 积分时间对成像系统的影响

积分时间是指红外焦平面成像系统探测器像元积累辐射信号产生电荷的时间^[4].红外焦平面阵列,由于其制造工艺的差异,系统的输出电压、响应率、噪音和比探测率等性能参量都与积分时间有关,致使各探测单元的输出对积分时间的改变比较敏感.当积分时间过小时,几乎无法观测到目标;当积分时间不断加大,输出也不断增强时,目标会逐渐清晰;当积分时间过大时,就会出现饱和现象.因此,根据不同目标的辐射强度,选择合适的积分时间是非常重要的,否则会严重影响获得图像的效果.

1.1 动态范围调整

动态范围通常定义为饱和输出值除以最小特定背景(如暗背景)下噪音测量值.焦平面器件动态范围可以定义为焦平面入射的饱和辐射通量与噪音等效照度之比,即

$$DR = Q_{\text{sat}} / NEI \quad (1)$$

焦平面器件动态范围更多地定义为输出的饱和信号电压与输出噪音电压之比,即

$$DR = V_{\text{sat}} / V_n \text{ (或 } DR = 20 \log(V_{\text{sat}} / V_n) \text{ dB)} \quad (2)$$

通常焦平面器件的动态范围为 60~80 dB.要获得较大的动态范围,必须增加信号的饱和值尽可能减小基准噪音.对给定的读出集成电路,最大输出电压主要受限于积分电路本身,可以采用自动增益开关、减少积分时间等方法增大信号.

1.2 探测元响应与积分时间的关系

读出集成电路是把焦平面的各种功能集成在单一的半导体芯片中的高集成度电路.其基本功能是对红外探测器信号的转换、放大以及多路传输,即将数据从许多探测器端依次传输到最少的输出端.读出集成电路的每个单元有特定的探测器、放大器和多路开关.大多数读出集成电路的前置放大器都是在一定的积分时间内对探测器的光生电流进行电荷积累^[5].

$$V_s = (V_{s_1} - V_{s_2}) A_R A_{\text{DIF}} = (i_{\text{out}} t_{\text{int}} / C_{\text{fb}}) A_R A_{\text{DIF}} \quad (3)$$

式中, V_{s_1} 和 V_{s_2} 为信号积分开始时和信号积分结束时焦平面探测器的输出; A_R 、 A_{DIF} 分别为读出电路和差分前置放大器的增益; i_{out} 为探测器的电流; t_{int} 为积分时间, C_{fb} 为积分电容.从式(3)中可以看出,在焦平面探测器的线性工作范围内,积分时间与输出信号成正比.

1.3 积分时间对响应非均匀性的影响

因为焦平面探测器的响应与积分时间成线性正比关系,所以,在正常工作的范围内,积分时间的大小并不影响焦平面探测器响应的非均匀性.但是,器件噪音实际上包含了探测器噪音、固定图案噪音和读出电路噪音等随机噪音,在不同积分时间下的非均匀性也会不同,所以同一组校正参量将不再不适用.

2 神经网络校正算法

2.1 算法原理

神经网络非均匀性校正^[6]算法是由美国海军武器装备研究中心的 Scribner 等人提出的.基本思想是:利用视网膜的视细胞之间存在横向联系和反馈回路的研究结果,采用神经网络结构,用像元四邻域平均值作为像元的理想输出,利用最小均方误差技术,自适应地进行校正系数的更新,实现自适应校正.原理框图如图 1.

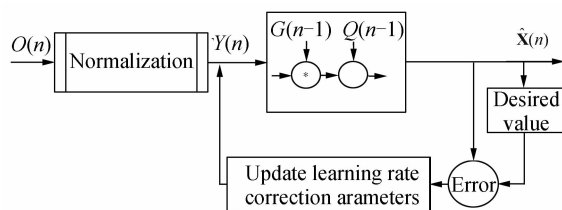


图 1 神经网络校正框图

Fig. 1 Neural Network correction block

2.1.1 图像的归一化处理

在实际更改参量过程中,更新增益参量和偏置参量的速度不平衡,为此,文中引入归一化思想,处理的目的是为了消除增益和偏置调整量的数量级的差别,降低对数据处理的复杂度.本文采用探测器输出图像的灰度级对图像灰度数据进行归一化,将其归一化到 $[0, 1]$ 区间上.

$$Y(n) = O(n) / L \quad (4)$$

那么估计校正后的值为

$$\hat{X}(n) = G(n)Y(n) + Q(n) \quad (5)$$

式中, $O(n)$ 为探测器的原始输出,初始化增益 $G(n)$ 为“1”,偏置 $Q(n)$ 为“0”, L 为输出图像的灰度级.则整个迭代过程的处理就都在 $[0, 1]$ 范围内,所以归一

化神经网络校正法对增益和偏置的调整几乎可以同步进行。

2.1.2 自适应学习率选择

Scribner 的神经网络校正算法,学习率是个固定值,且大小不易选取.从文献[7]可以看出,学习率选的过大很容易产生“鬼影”,而当学习率选的较小时与之而来的代价是收敛速度的降低。

本文采用自适应学习率,其中 K 为最大学习率(文中 $K=0.999$), L 为输出图像的灰度级。

$$\xi_{ij}(n) = \frac{K}{1+L\eta_{T_{ij}}(n)} \quad (6)$$

$\eta_{T_{ij}}(n)$ 为该像元与其八邻域像元的方差,这里用绝对差和来替代.其中 $\eta_{T_{ij}}(n)$ 为

$$\begin{aligned} \eta_{T_{ij}}(n) = & |T_{i-1,j-1}(n) - T_{ij}(n)| + |T_{i,j-1}(n) - \\ & T_{ij}(n)| + |T_{i-1,j}(n) - T_{ij}(n)| + |T_{i+1,j}(n) - \\ & T_{ij}(n)| + |T_{i,j+1}(n) - T_{ij}(n)| + |T_{i-1,j+1}(n) - \\ & T_{ij}(n)| + |T_{i+1,j-1}(n) - T_{ij}(n)| + |T_{i+1,j+1}(n) - \\ & T_{ij}(n)| \end{aligned} \quad (7)$$

在自适应非均匀校正方法^[8-9]中,局部灰度邻域平滑不一定能够较好地代替期望目标.本文采取用邻域方差控制自适应的步长的更新.如果给定的输入图像是均匀的,那么 $\eta_{T_{ij}}(n)=0$.采用该步长能够抑制大量的伪像,当遇到图像边缘的情况,其步长也会随之降低。

2.1.3 算法流程

1) 初始化增益 $G(n)$, 偏置 $Q(n)$, 对输出做归一化,估计校正后的图像为

$$\hat{X}(n) = G(n) \cdot Y(n) + Q(n) \quad (8)$$

式中 $Y(n)$ 为归一化后的探测器的输出, $\hat{X}(n)$ 为校正后的输出, L 为灰度级, n 为图像帧数。

2) 计算每个像元邻域平均值.作为第 (i, j) 个像元的理想输出为

$$\begin{aligned} T_{ij}(n) = & \frac{1}{4} (\hat{X}_{i,j+1}(n-1) + \hat{X}_{i-1,j}(n-1) + \\ & \hat{X}_{i,j-1}(n-1) + \hat{X}_{i+1,j}(n-1)) \end{aligned} \quad (9)$$

3) 计算误差函数

$$E_{ij}(n) = (\hat{X}_{ij}(n) - T_{ij}(n))^2 \quad (10)$$

4) 利用此误差函数的梯度函数和最陡下降法对该像元的后继输入计算出 G 和 Q 合适的回归估计。

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{ij}(n)}{\partial G_{ij}(n)} = & 2Y_{ij}(n)(G_{ij}(n)Y_{ij}(n) + \\ & Q_{ij}(n) - T_{ij}(n)) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{\partial E_{ij}(n)}{\partial Q_{ij}(n)} = 2(G_{ij}(n)Y_{ij}(n) + Q_{ij}(n) - T_{ij}(n))$$

5) 逐帧迭代,更新校正参量,则下降路径可记

为

$$\begin{aligned} G_{ij}(n+1) = & G_{ij}(n) - \xi_{ij}(n)E_{ij}(n)Y_{ij}(n) \\ Q_{ij}(n+1) = & Q_{ij}(n) - \xi_{ij}(n)E_{ij}(n) \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 算法分析

神经网络校正算法是空域运算方法的代表,可以完全不用进行标定,是红外成像系统的理想境界,也是目前实验室研究的热点之一.优点在于同时完成对增益和偏移响应系数的校正,对空间高频噪声抑制效果较好,但同样存在目标退化和“鬼影”现象,而且收敛速度较慢。

传统的神经网络校正算法假设图像相邻像元间存在一定的相关度,进而采用四邻域平均求期望信号.在时域内对图像作均值滤波就等效于在频域内对图像用均值模板的频域响应对图像的频域响应作一个低通滤波.虽然能够抑制一定的高频噪声,但当实 IRFPA 空间噪声是低频占优时,神经网络校正算法是无法消除频率较低的空间噪声^[10].因此可以预先采用初始校正去除部分加性噪声,使得剩余的空间噪声主要由乘性噪声以及少量的加性噪声组成.继而采用神经网络算法进行后续校正,这样既可以同步更新校正系数加快算法的收敛速度,同时也能够补偿系统由时间变化而产生的温漂,将能得到较好的校正效果。

3 自适应积分时间神经网络校正

自适应变积分时间工作方式可以自动调整 IRFPA 成像系统的动态范围,该方法以探测到的目标或场景的信息作为反馈量自适应地调节系统的积分时间,实现对系统动态范围的自动调整,从而获得一个较宽的动态范围。

3.1 积分时间调整方法

积分时间的调整主要是根据获得图像中目标的灰度值的变化来改变的,其基本原则是将获得的灰度值与定标获得的最优灰度值相比较,切换到合适的积分时间下.目前有两种不同的模式:

1) 基于图像灰度信息的提取模式

对于分布均匀、变化不大的场景,如城市建筑、河流山脉等,其场景的灰度分布亦比较均匀,因此,可将整幅图像的灰度值、对比度等参量作为衡量图像质量的指标.当输出图像的平均灰度值、灰度差处于适当的范围时,即可获得清晰的图像,从而观测到目标物.基于图像灰度信息的提取模式,是利用输出图像的整体灰度信息和系统的标定结果进行比较,根据相应的调整准则来判断当前积分时间是否需要调整。

2) 基于图像重点信息的提取模式

该方法主要是针对目标区域较小,且其灰度与背景有较大反差或背景过于复杂的情况.如沙漠或天空中的孤立小目标与背景灰度相差较大时,或场景背景过于复杂并对目标形成一定干扰时,若仍以整幅图像的灰度信息作为评价图像质量的因素,则必定有失准确性,造成误判,从而无法正确调整积分时间获得清晰图像.在观测图像时,通常人眼习惯于集中在图像中央区域,因此当观测目标物置于图像中央区域后,可通过重点加权平均测光,求取中央区域的平均灰度值,有针对性地获取灰度信息,再依照基于图像整体灰度信息的提取模式算法做门限判定,选择合适的积分时间.重点加权平均灰度可在一定程度上去掉背景对目标物观测的影响,准确地提取目标信息选择有效的积分时间.

3.2 定标积分时间与神经网络校正

由于焦平面探测器的响应与积分时间成线性正比关系,那么输出响应就可以与积分时间建立一种一一对应的关系.基本思想是建立一个积分时间与响应灰度值范围的查找表(见表1),设定 n 个等间隔为 ΔT 的积分时间范围 $[T_{min} \quad T_{max}]$,将不同积分时间下探测器的输出背景图像数据存储起来.在此,本文选用输出图像的平均灰度值 $[V_{min} \quad V_{max}]$ 为阈值实现积分时间的自适应切换.具体实现步骤如下:

表 1 平均灰度值与积分时间的对应关系

Table 1 Relation of average gray and integration time

The average gray value	Integration time
$(V_{min} \quad V_1)$	T_{min}
...	...
$(V_{n-2} \quad V_{n-1})$	$T_{min} + (n-1)\Delta T$
$(V_{n-1} \quad V_{max})$	T_{max}

- 1) 设定初始积分时间为 $(T_{min} + T_{max})/2$;
- 2) 存储各积分时间下的探测器输出的背景噪声图像;
- 3) 通过实验确定查找表如表1所示,根据实时图像的灰度平均值切换到对应的积分时间;
- 4) 减去相应积分时间下的背景图像,送入神经网络自适应校正.

基于积分时间与平均灰度值的查找表,将探测器的每一帧输出进行初始校正,其中 $Y_{raw}(n)$ 为探测器的原始输出, $Y_{back}(n)$ 为积分时间为 m 时定标的背景噪声图像.

$$Y(n) = Y_{raw}(n) - Y_{back}(m) \tag{13}$$

将初始校正后的 $Y(n)$ 作为神经网络的输入,则只需校正残留的非均匀性,根据设定的平均灰度值与积分时间的查找表在调整积分时间的同时减去相应的背景噪声图像.这样可以弥补神经网络校正算法在空间噪声低频占优时的不足,同时抑制了由于

切换积分时间而产生的非均匀性,使得校正参量可以快速收敛,连续更新,并能不断补偿由于时间和环境改变带来的系统的温漂.具体实现流程如图2.

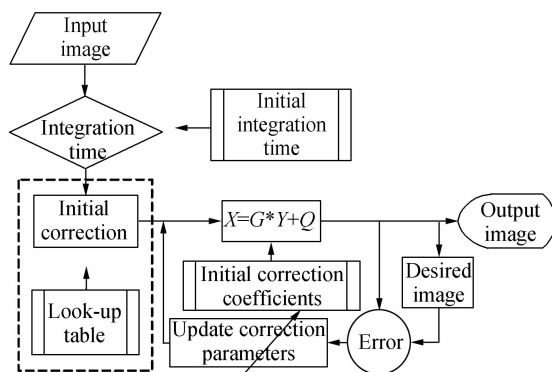


图 2 非均匀性校正流程

Fig. 2 Non-uniformity correction block

在自适应校正的过程中通过判断平均灰度值的范围就可以实现积分时间的自适应切换,这种方法操作简单,在标定类非均匀校正算法中得到了较多的应用,并且能够达到很好的效果.但是,对应每个积分点的数据都有存储,需要较大的存储空间.

4 实验仿真结果

实验中所用红外探测器采用法国 SOFRADIR 公司生产的 320×256 制冷型 IRFPA,采集了一段真实的红外视频共 4 151 帧,其中包含了 4 个积分时间段,分别为 1 ms、1.3 ms、1.65 ms、2.13 ms.其中图3为积分时间与平均灰度值的曲线,图4为上述 4 个积分时间对应的背景噪声帧.

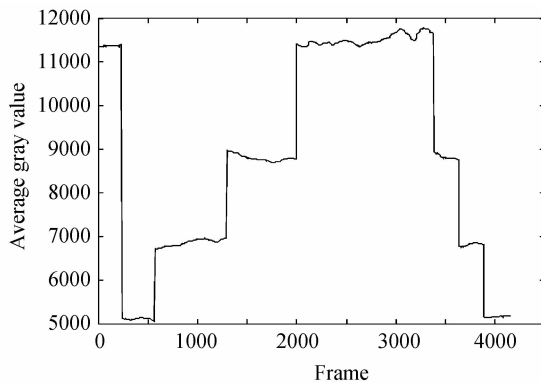
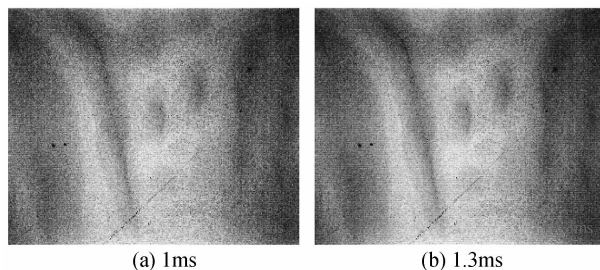


图 3 积分时间与平均灰度值曲线

Fig. 3 Integration time and average gray curve



(a) 1ms

(b) 1.3ms

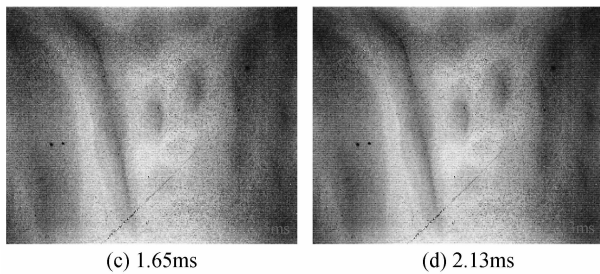


图4 各积分时间下的背景噪音图像

Fig. 4 Background frames in different integration time

本文采用 Matlab 验证了算法的有效性. 图 5 对比了视频中几组积分时间切换的临界点校正后的图像.

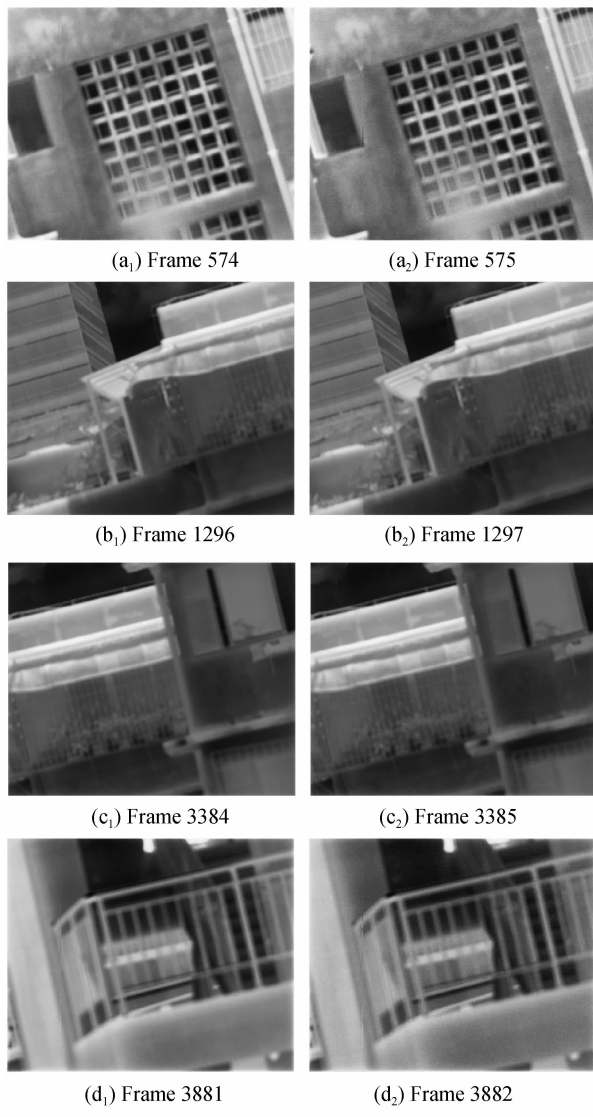


图5 文中算法校正后的图像

Fig. 5 Corrected frames by proposed algorithm

本文算法弥补了神经网络校正算法的不足,能够实现校正参量的自适应更新与积分时间的实时切换.从校正后的图像可以看出,在积分时间切换后的图像非均匀性没有重新产生,校正参量不需要重新收敛.

5 结论

实验表明,本文算法能够根据实时场景信息选择适当的积分时间提高系统的动态范围,同时实现自适应非均匀性校正,并能够获得较清晰的图像.虽然需要对每个积分时间点定标其背景噪音图像,但是操作简单易行,具有一定的实际工程意义.

参考文献

- [1] TAO Kun-yu, LI Fu-wei, ZHUO Yan-ping, IRFPA imaging system dynamic range adaptive adjust technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 265-269.
陶坤宇, 李福巍, 周彦平. 红外焦平面成像系统动态范围自适应技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(2): 265-269.
- [2] WANG Rui, SHAO Xiao-peng, XU Jun, *et al.* Study on improving dynamic range of infrared imaging system based on calibrating integration time[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(7): 381-385.
王锐, 邵晓鹏, 徐军, 等. 基于定标积分时间法提高红外成像系统动态范围的研究[J]. *红外技术*, 2009, **31**(7): 381-385.
- [3] RICHARDS A A, CROMWELL B K. Scene dynamic range extension of infrared cameras[C]. *SPIE*, 2004, **5612**: 199-205.
- [4] LI Fu-wei, ZHANG Yun-qiang. Influence of integration time on IRFPA imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(5): 727-730.
李福巍, 张运强. 积分时间对红外焦平面成像系统的影响[J]. *应用光学*, 2008, **29**(5): 727-730.
- [5] LEND Han-bing, TANG Xin-yi, PENG Ding-xiang. Research on nonuniformity correction of IRFPA based on integral time adjust [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(4): 246-250.
冷寒冰, 汤心溢, 彭鼎祥. 基于积分时间调整的红外焦平面阵列非均匀校正算法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(4): 246-250.
- [6] SCRIBNER D A, SAKADY K A, *et al.* Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques[C]. *SPIE*, 1990, **1308**: 224-233.
- [7] ROSSI A, DIANI M, CORSINI G. Bilateral filter based adaptive non-uniformity correction for infrared focal plane array systems[J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(5): 2-13.
- [8] YIN Shi-min, XIANG Li-bin, ZHOU Jin-song, *et al.* Research on non-uniformity correction of IRFPA based on radiation source scaling[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 992-995.
殷世民, 相里斌, 周锦松, 等. 辐射源定标红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 992-995.
- [9] WANG Xian-ya, CHEN Qian, GU Guo-hua, *et al.* A nonuniformity correction technique of IRFPA based on BP neural network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1504-1506.
王娴雅, 陈钱, 顾国华, 等. 基于BP神经网络的红外焦平面非均匀性校正技术[J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1504-1506.
- [10] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan, CAO Zhi-guo, *et al.* Study on the property of spatial frequency of nonuniformity noise in IRFPA and the important of spatial adaptive nonuniformity correction technique [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **24**(4): 255-260.
张天序, 石岩, 曹治国, 等. 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[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(4): 255-260.