

·信号与信息处理·

## 640×512 中波红外成像系统实时信号处理关键技术

汪晓洁, 张廷玉

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

**摘要:**影响制冷型中波红外焦平面探测器图像质量的因素主要包括响应的非均匀性、响应的漂移特性和盲元等。因此,在红外焦平面成像系统中要进行实时的非均匀性校正、漂移补偿和盲元替代等信号处理。首先,设计一套高帧频低噪声640×512像元的制冷型中波红外成像系统,并进行动态范围标定,实现其在全动态范围内NETD小于30 mK。接着,针对焦平面像元的响应特性,研究了适用于红外成像系统的非均匀性和盲元的校正方法,提出了基于辐射定标和场景融合的非均匀校正、盲元检测及替代算法。最后,进行外场红外图像数据采集。经实验验证,其图像校正效果优良,易于实现,且具有较强的环境适应性。

**关键词:**制冷型中波红外焦平面;红外成像系统;辐射定标;动态范围;非均匀性校正;盲元检测

中图分类号: TN214

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-03-0042-06

## Key Techniques of Real Time Signal Processing for 640×512 MWIR Imaging System

WANG Xiao-jie, ZHANG Ting-yu

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

**Abstract:** The factors affecting the image quality of refrigerating medium wave infrared (MWIR) focal plane detectors include non-uniformity of response, drift characteristics of response and blind pixel. So signal processing in real time such as non-uniformity correction, drift compensation and blind pixel substitution is required in infrared focal plane imaging system. At first, a refrigerating MWIR image system with high frame frequency, low noise and 640×512 pixels is designed. And the dynamic range is calibrated to implement the  $NETD \leq 30$  mK in full dynamic range. And then, according to the response characteristics of the pixels in the focal plane, the non-uniformity and blind pixel correction method suitable for the infrared imaging system are researched. A non-uniformity correction, blind pixel detection and substitution algorithm based on radiation calibration and scene fusion is put forward. At last, the infrared image data is collected in field experiment. Experimental results show that the method has a good image correction effect, easy to be implemented, and it has strong environmental adaptability.

**Key words:** refrigerating medium wave infrared (MWIR) focal plane; infrared imaging system; radiation calibration; dynamic range; non-uniformity correction; blind pixel detection

随着微电子技术、大规模集成电路技术和信号处理技术的发展,红外焦平面阵列探测器和红外热成像采集及处理技术日益成熟,特别是在军事领域内,已被广泛应用于精确武器制导、红外告警及跟踪装置等。但由于受材料和制造工艺等原因限制,红外焦平面阵列探测器各个像元的响应率的不一

致,导致采集到的红外图像具有不均匀性,再加上无效像元(包括死像元和过热像元)以及其他噪声的存在,导致红外成像质量差。非均匀性导致红外图像存在固定图案噪声,响应漂移性导致图像信号的缓慢变化而产生像质变差,盲元导致红外图像存在亮点、暗点或闪点。因此,对采集后的原始红外

收稿日期: 2018-04-10

作者简介:汪晓洁(1983-),女,吉林省人,硕士研究生,主要研究方向为红外技术。

图像进行实时非均匀校正、漂移补偿和盲元替代等信号实时处理是必要的,也是红外成像系统提取检测目标等后续图像处理的基础<sup>[1-2]</sup>。

选用制冷型640×512像元的中波红外探测器,设计一套高帧频低噪声成像系统,利用其实测的响应数据,分析了红外焦平面探测器像元响应率与入射辐射和积分时间的关系,研究了适用于红外焦平面成像系统的非均匀性校正和盲元替代的方法,使

红外成像系统的实时信号处理满足使用要求。

## 1 640×512中波红外成像系统

640×512中波红外成像系统主要由红外光学镜头、制冷型中波红外焦平面探测器、探测器读出电路、信号处理电路和电源转换电路等组成<sup>[3-4]</sup>,结构组成框图如图1所示。

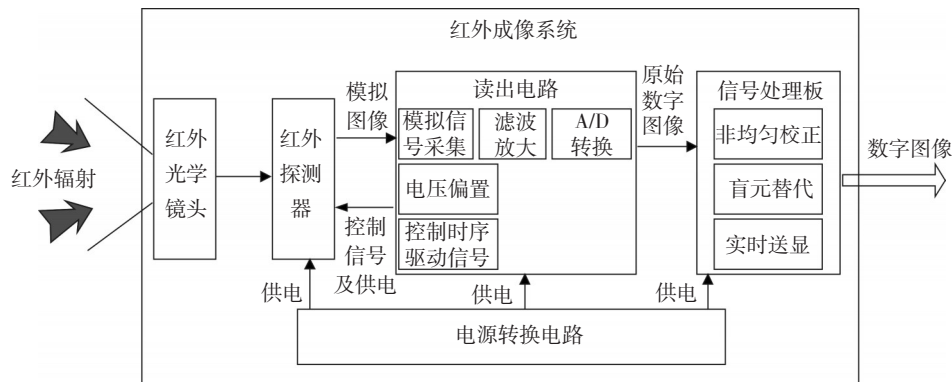


图1 红外成像系统组成框图

其中,制冷型中波红外探测器像元数为640×512个,波长响应范围为3.7~4.8 μm,其工作积分时间可调,输出图像帧频最高可达120 Hz<sup>[5]</sup>。探测器读出电路向红外探测器输入偏置电压和驱动信号等,并接收红外探测器输出的4路模拟信号,将4路模拟信号分别进行放大、滤波后进行A/D转换,输出4路原始数字图像信号至信号处理电路。信号处理电路中的主控芯片FPGA接收4路原始数字图像信号后,通过外部存储资源和预置好的算法程序,实时进行非均匀校正、盲元剔除和实时送显等信号处理,最终输出校正后的数字图像。

## 2 动态范围的标定

制冷型640×512像元的中波红外探测器有GAIN0和GAIN1两种增益模式,通过驱动电压设置使其工作在GAIN1模式,探测器输出的模拟图像信号电压范围为:0.9~3 V(动态范围2.1 V),首先根据此范围初步设置读出电路的增益和偏置电压,使信号与A/D转换芯片的输入电压范围匹配,然后再通过对读出电路增益和偏置的调整,使成像系统输入辐射通量与输出灰度值范围线性匹配,最终完成对成像系统动态范围的标定。

根据成像系统实际被测目标的温度,设定系统测温的动态范围为0℃~50℃,首先需要确定积分时间,通常提高积分时间能相应提高成像系统的灵敏度,但积分时间过高会导致探测器在温度动态范围内输出饱和,所以积分时间的选择应同时兼顾系统灵敏度和响应精度,成像系统的积分时间选为3 ms。

设置积分时间后,对成像系统进行初步辐射定标,成像系统输出的灰度值与光学镜头入瞳处辐射通量密度之间的关系曲线为

$$h = k_1 \varphi(T) + b_1 \quad (1)$$

式中, $h$ 为输出的灰度值; $k_1$ 为实际增益; $b_1$ 为实际偏置电压; $\varphi(T)$ 为黑体辐射通量密度。辐射通量 $\varphi(T)$ 可由普朗克公式得出

$$\varphi(T, \lambda_1 - \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (2)$$

式中, $c_1$ 、 $c_2$ 分别为第一辐射常数和第二辐射常数。

为了使探测器输出图像信号能充分利用AD转换电路的量化范围,减小噪声,需要对电路的增益和偏置进一步进行调整。选择温度动态范围的高低端所对应的AD量化值

$$h_{\min} = k_2 \varphi(T_{\min}) + b_2, h_{\max} = k_2 \varphi(T_{\max}) + b_2 \quad (3)$$

通过式(3)得出期望的输出响应曲线为

$$h = k_2 \varphi(T) + b_2 \quad (4)$$

根据式(1)和式(4)可得到电路所需增益为现有增益的  $k_2/k_1$  倍,再结合AD本身的电压量化关系

$$h = pV_{in} + q \quad (5)$$

式中,  $V_{in}$  为AD的输入电压。可推出新的电路偏置为

$$b_2' = \frac{b_2 - q - \frac{k_2}{k_1}(b_1 - pb_1 - q)}{p} \quad (6)$$

式中,  $b_1$  为调整前的电路偏置电压。

调整电路增益和偏置后,再对成像系统进行基于积分时间变量的二次辐射定标,进而实现非均匀校正和盲元检测,最终实现一套测温动态范围为  $0\text{ }^\circ\text{C}\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,在全动态范围内 NETD 小于  $30\text{ mK}$  的红外成像系统。

### 3 基于积分时间变量的辐射定标

在红外成像系统中,非均匀性的原因除了红外焦平面阵列响应非均匀性、温度漂移性和盲元外,还包括红外光学系统非均匀性、红外焦平面温度变化引起的响应漂移性和读出电路非均匀性等。

上述问题将导致红外成像系统的图像质量显著下降,因而,几乎毫无例外地对焦平面红外探测器进行非均匀校正。目前,国内外已经提出的关于焦平面红外探测器非均匀性校正的算法主要分为两类:基于辐射定标和基于场景的校正技术。基于辐射定标的非均匀性校正算法需要实现获得校正所需要的定标系数,然后再校正实现过程中调用这些数据做相应处理,算法精度高、稳定性好以及便于硬件实时实现,但当漂移很大时,需要重新定标来更新校正系数;基于场景的非均匀性校正算法是利用场景信息的变化即时估计出探测元的增益和偏移量,可自适应探测元输出的漂移,缺点是数据量大、算法复杂、校正精度不高和硬件实现难度大。通过在实验室使用面源黑体对中波制冷型红外探测器进行辐射定标,建立了包括积分时间变量的辐射定标模型,根据该模型提出了简化的辐射定标方法,这是基于数字图像处理技术实现探测器非均匀性校正的基础。

在红外成像系统线性响应范围内,红外探测器

像元  $(i,j)$  灰度值可表示为函数

$$h_{i,j} = f(\tau, L^{\text{in}}(T)) + h_{i,j}^{\text{noise}} \quad (7)$$

式中,面源黑体辐射温度为  $T$ ;  $h_{i,j}$  为红外探测器上像元  $(i,j)$  的响应灰度值;  $\tau$  为探测器积分时间;  $L^{\text{in}}(T)$  为温度为  $T$  的面源黑体入射到探测器上的辐射亮度;  $h_{i,j}^{\text{noise}}$  为像元  $(i,j)$  的暗电流引起的探测器像元灰度输出。

利用上述红外成像系统,通过实验,找出探测器像元的响应、黑体入射辐射亮度及积分时间等参数之间的关系。实验时,采用CI公司的SR-800R型的高精度面源黑体,辐射面大小为  $12''\times 12''$ ,温度控制精度为  $0.001\text{ }^\circ\text{C}$ ,工作温度范围为  $-40\text{ }^\circ\text{C}\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ 。红外成像系统输出灰度值位数为16位,探测器像元为  $15\text{ }\mu\text{m}$ ,  $F\# = 2$ 。

#### 3.1 探测器像元响应与入射辐射之间的关系

固定积分时间  $1\text{ ms}$ ,在  $25\text{ }^\circ\text{C}$  环境温度下,只改变入射黑体辐射亮度,使其范围为  $1\sim 5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$ ,采样间隔为  $0.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$ ,采集图像灰度值;然后改变积分时间分别为  $1\text{ ms}$ 、 $2\text{ ms}$ 、 $3\text{ ms}$ 、 $4\text{ ms}$ ,并分别重复上述试验过程;以探测器中心像元  $(319, 255)$  为样本,其响应灰度值在固定入射积分时间  $(1\sim 4\text{ ms})$  下随入射辐射的变化曲线如图2所示。

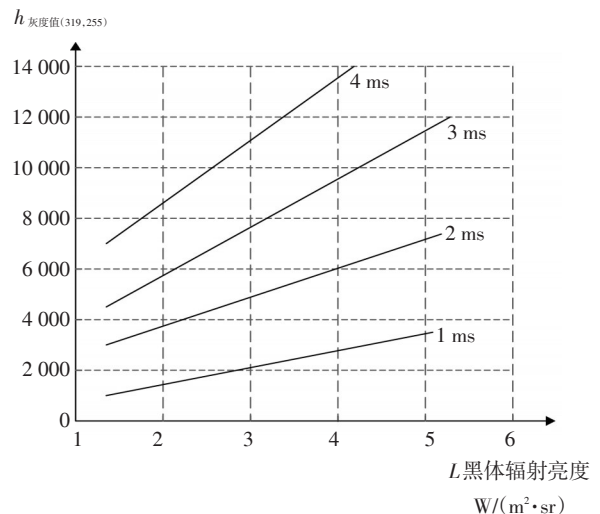


图2 像元响应灰度值与入射辐射之间的关系曲线

由图2可知,积分时间固定时,探测器像元响应灰度值与黑体辐射亮度成正比,而且随着积分时间的增加,响应曲线斜率增大。

### 3.2 探测器像元响应与积分时间之间的关系

固定入射黑体温度(10℃),在25℃环境温度下,只改变积分时间,使其范围为0~5ms,采样间隔为100μs,采集图像灰度值;然后改变入射黑体温度分别为10℃、20℃、30℃、40℃、50℃,并分别重复上述试验过程;以探测器中心像元(319,255)为样本,其响应灰度值在固定入射黑体辐射(10℃~50℃)下随积分的变化曲线如图3所示。

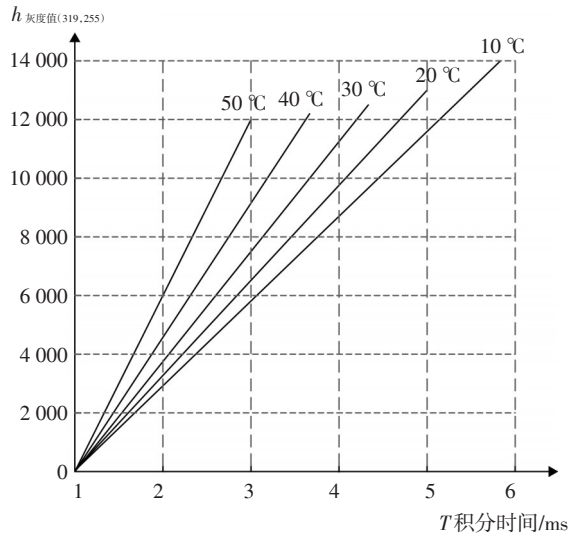


图3 像元响应灰度值与积分时间之间的关系曲线

由图3可知,入射的黑体辐射固定时,探测器像元的响应灰度值与积分时间成正比,而且随着黑体辐射的升高,响应曲线的斜率增大。

根据以上结论,可得辐射定标数学模型如下

$$h_{i,j} = \tau \times (G_{i,j} \times L^{BB}(T) + h_{i,j}^{stray}) + h_{i,j}^{noise} \quad (8)$$

式中, $G_{i,j}$ 为像元( $i,j$ )的红外辐射响应率; $h_{i,j}^{stray}$ 为杂散辐射引起的像元响应灰度, $h_{i,j}^{stray} = G_{i,j} \times L^{stray}(T)$ 。

当背景温度发生改变时,与温度有关的 $h_{i,j}^{stray}$ 会随温度变化而相应变化,而 $G_{i,j}$ 和 $h_{i,j}^{noise}$ 由于反应了探测器自身像元特性而变化较小。这是采用最小二乘法拟合焦平面各像元响应特性进行非均匀校正的理论基础。

## 4 基于辐射定标和场景融合非均匀校正算法

通过像元响应灰度值与入射辐射和积分时间之间的关系可知,改变入射辐射或积分时间都可以

得到各个像元不同的响应值,因此,以这些响应值为基础,可以计算出非均匀校正所需要的各像元的增益校正系数和偏置校正系数<sup>[8-10]</sup>。

### 4.1 黑体辐射定标两点校正算法

理想情况下,探测像元在达到饱和之前,每个探测单元响应灰度值与辐射量之间是正比线性关系,且探测单元的响应具有时不变性并其受随机噪声的影响较小,探测像元( $i,j$ )响应方程为

$$Y_{i,j}(\varphi) = k_{i,j} X_{i,j}(\varphi) + b_{i,j} \quad (9)$$

式中, $\varphi$ 为辐射通量,在积分时间确定的前提下, $Y_{i,j}$ 和 $X_{i,j}$ 为红外探测器上像元( $i,j$ )的校正前后响应灰度值, $k_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 分别为增益和偏置系数。选取高低温两个温度点 $T_H$ 和 $T_L$ ,红外成像系统对应得到高低温两组多帧灰度值,分别计算出焦平面阵列中所有 $M \times N$ 个像元的平均输出。

在低温 $T_L$ 时

$$Y_L(\varphi_L) = k_{i,j} \overline{X_{i,j}}(\varphi_L) + b_{i,j} \quad (10)$$

在高温 $T_H$ 时

$$Y_H(\varphi_H) = k_{i,j} \overline{X_{i,j}}(\varphi_H) + b_{i,j} \quad (11)$$

则可得各像元的增益和偏置系数为

$$\begin{cases} k_{i,j} = \frac{Y_H(\varphi_H) - Y_L(\varphi_L)}{\overline{X_{i,j}}(\varphi_H) - \overline{X_{i,j}}(\varphi_L)} \\ b_{i,j} = \frac{Y_L(\varphi_L) \overline{X_{i,j}}(\varphi_H) - Y_H(\varphi_H) \overline{X_{i,j}}(\varphi_L)}{\overline{X_{i,j}}(\varphi_H) - \overline{X_{i,j}}(\varphi_L)} \end{cases} \quad (12)$$

该校正算法的本质是利用高、低温黑体得到各像元的响应灰度值,并以此为基础依据公式(12)计算出校正系数,最后,利用辐射定标两点校正通用公式(9)实现非均匀校正。在辐射定标中所得的参数可用于焦平面盲元位置的检测。

### 4.2 辐射定标和场景融合校正算法及实验结果

基于辐射定标的校正算法,其稳定性和实时性较强,易于硬件实现。但随着系统工作时间的延长和外场使用环境的复杂多变,红外焦平面温度发生变化,进而引起其响应发生漂移,提出了采用辐射定标和场景融合的校正算法,通过相关系数来修正非均匀性偏置校正系数,以自适应克服焦平面阵列探测单元的响应漂移性,实现外场自适应非均匀校正。

经过实验室多次采集的红外图像数据可知,红外焦平面阵列发生温漂时,其探测单元响应的偏置系数漂移较大,增益系数偏移较小,如图4所示。

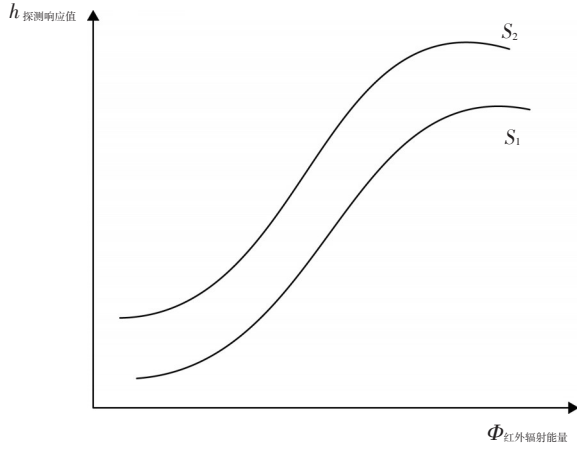


图4 红外焦平面阵列探测单元响应漂移曲线

因此,可以通过消除非均匀校正偏置系数的漂移来减少非均匀校正误差。参考式(9),得到定标和场景融合非均匀校正公式为

$$Y_{i,j} = k_{i,j} X_{i,j} + R b_{i,j} \quad (13)$$

式中, $R$ 表示场景图像与特征模板图像的相关系数; $R b_{i,j}$ 表示修正后的偏置系数。

校正过程中的红外特征模块图像可以在实验室环境条件下获取,红外场景图可以在外出使用环境条件下获得。在相同辐射通量下,红外特征模板图像与场景图像之间存在漂移现象且具有一定的相关性,因此,根据图像灰度相关匹配算法对特征模板图像与场景图像进行相似性度量,其相关系数 $R$ 的公式为

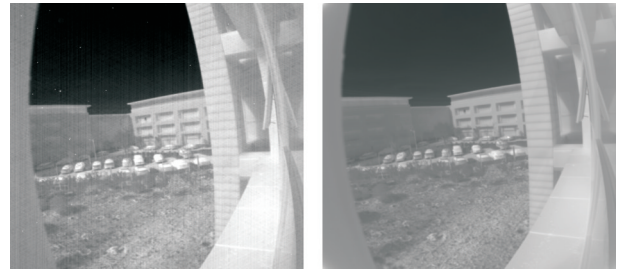
$$R = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [V_{ij}(\varphi_l) - \bar{V}_{ij}(\varphi_l)] [X_{ij} - \bar{X}_{ij}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [V_{ij}(\varphi_l) - \bar{V}_{ij}(\varphi_l)]^2 \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [X_{ij} - \bar{X}_{ij}]^2}} \quad (14)$$

式中, $M$ 和 $N$ 分别表示焦平面的行数和列数; $X_{ij}$ 和 $\bar{X}_{ij}$ 分别表示场景图像及其均值; $V_{ij}(\varphi_l)$ 和 $\bar{V}_{ij}(\varphi_l)$ 分别表示特征模板(低温黑体)图像及其均值。

首先,按照3.1节方法,得到两点校正参数 $k_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 后,再利用红外成像系统采集的场景图像 $X_{ij}$ 与特征模板图像通过式(14)计算场景图像与特征

模板图像的相关系数 $R$ ,最后,通过相关系数来实时修正偏置参数,利用式(13)输出非均匀校正后的图像,实现外场图像实时非均匀校正。

下面给出红外成像系统在室外环境下实时采集和校正的效果图,通过校正后的图像大多数噪声已被抑制,图像对比度提高,定标和场景融合校正算法具有较强的环境适应性能,校正效果良好,易于实现。



(a)校正前

(b)校正后

图5 室外环境下校正前后红外图像

## 5 盲元检测及替代方法

根据实验数据分析,盲元不仅包含红外焦平面国标中定义的死像元和过热像元,还包含闪烁像元。盲元检测及替代方法,即在基于辐射定标和场景融合校正算法实现的同时,将盲元进行检测和标记,之后根据相邻像素的相关性对盲元进行替代。

### 5.1 盲元检测

(1)死像元检测:根据上述定义,若像元 $(i,j)$ 响应曲线斜率 $k_{i,j}$ 满足式(15)和式(16),则判定像元 $(i,j)$ 为盲元。

$$\bar{k} = \frac{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y k_{ij}}{X \cdot Y} \quad (15)$$

$$|k_{i,j} - \bar{k}| > 90\% \times \bar{k} \quad (16)$$

(2)过热像元检测:根据上述定义,采集多帧图像求出各像元的标准差 $\sigma_{i,j}$ ,若像元 $(i,j)$ 的噪声满足式(17)和式(18),则判定像元 $(i,j)$ 为盲元。

$$\sigma_{i,j} - \bar{\sigma} > 10\bar{\sigma} \quad (17)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y \sigma_{ij}}{X \cdot Y} \quad (18)$$

(3)闪烁像元检测:闪点对于高温、低温均匀面源黑体各采集多帧 $(2N)$ 图像数据,若像元 $(i,j)$ 超

过  $N$  帧图像相邻前后两帧灰度值差值大于 100, 则判定像元  $(i, j)$  为盲元。

其中, 经过多次实验验证,  $N$  取 50。

## 5.2 盲元替代

盲元替代是指根据相邻像素或前后帧图像的相关性对盲元信息进行预测和替代的过程。由图像信息理论可知, 其相邻像素或相邻帧之间的图像数据具有极高的相关性; 由插值理论可知, 对于连续变化的函数, 任何一点都可以通过邻域进行插值预测, 目前均采用线性插值对盲元进行替代。对于孤立的盲元和局部区域出现较大盲元块的情况, 除利用图像的空间相关性外, 还应考虑连续帧之间的时间相关性, 即盲元补偿时将前一帧已替代后的灰度值作为当前帧替代的一个计算因子, 另外, 由于对于某一像元, 离其越近的像元与其相关度越大, 反之越小, 利用两个像元之间的距离(间隔)来表示两个像元的相关性强度, 即相关度  $\lambda$ , 则四邻域像元  $P_{上}$ 、 $P_{下}$ 、 $P_{左}$ 、 $P_{右}$  存在下式

$$\lambda_{上} + \lambda_{下} + \lambda_{左} + \lambda_{右} = 1 \quad (19)$$

文中提出的盲元替代方法由空间替代和时间替代两部分组成, 它们各占替代值的一半。

第  $k$  帧图像像元  $(i, j)$  的盲元替代值用  $P(i, j, k)$  表示, 第  $k-1$  帧图像像元  $(i, j)$  的盲元替代值用  $P(i, j, k-1)$  表示, 则, 盲元补偿值计算公式为

$$P(i, j, k) = \frac{1}{2}(\lambda_{上} \cdot P_{上} + \lambda_{下} \cdot P_{下} + \lambda_{左} \cdot P_{左} + \lambda_{右} \cdot P_{右}) + \frac{1}{2}P(i, j, k-1) \quad (20)$$

在信号处理板的 FPGA 中, 利用该方程实现系统盲元替代, 它处于整个信号处理流水线的一环, 只需要缓存一帧图像, 不存在延迟, 在很好的替代盲元的同时保证了成像系统的实时性。



图6 盲元替代前后红外图像对比

## 6 结 论

搭建了基于制冷型中波探测器的红外成像系统, 通过在实验室内采集标准黑体产生的特征模板图像, 提出了包括积分时间变量的简化辐射定标方法。根据红外焦平面的响应特性, 研究了实时实现的非均匀性和盲元替代校正算法, 提出了基于辐射定标和场景融合的非均匀性以及基于空间相关和时间相关的盲元替代校正算法, 校正算法由 FPGA 信号处理流水线操作完成, 对成像系统缓存资源要求低, 且不存在延迟, 系统校正的实时性强, 易于实现。

## 参考文献

- [1] 常本康, 蔡毅. 红外成像阵列与系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 3-8.
- [2] 曾戈虹. HgCdTe 红外探测器性能分析[J]. 红外技术, 2012, 34(1): 1-3, 15.
- [3] 许照东, 刘欣, 尉钟. 采用 640×512 元探测器的机载红外系统设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(4): 524-529.
- [4] 张洋, 张记龙, 杜旋燕. 基于 HgCdTe 红外探测器的微弱信号检测电路设计[J]. 应用光学, 2011, 32(4): 779-783.
- [5] Thomas Svensson, Ingmar Renhorn. A study of the radiometric calibration of spectral bands in the mid wave infrared (MWIR) spectral range 1.5-5.5  $\mu\text{m}$ [J]// SPIE, 2009, 7300, 7300Z.
- [6] 李宪圣, 任建伟, 张立国. 大口径红外光电系统现场辐射定标装置的研制[J]. 光电子·激光, 2006, 17(2): 175-178.
- [7] 刘宁, 陈钱, 顾国华. 640×512 制冷探测器非线性响应分析[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 921-925.
- [8] Ratliff B M, Hayat M M, Tyo J S. Generalized algebraic scene-based non-uniformity correction algorithm[J]. J Opt Soc Am A, 2005, 22(2): 239-249.
- [9] 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的研究[J]. 2007, 26(4): 246-250.
- [10] 陈大川, 刘缠牢, 郑阳光. 红外焦平面阵列盲元检测及补偿算法[J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1215-1217.