

文章编号:1004-4213(2011)06-0926-7

基于焦平面归一化响应特性的红外非均匀性校正

左超,陈钱,顾国华

(南京理工大学 光电工程国防重点学科实验室,南京 210094)

摘要:红外焦平面阵列的非均匀性噪音是制约红外成像质量的主要因素,非均匀性校正是红外焦平面器件应用的一个关键技术.本文提出了一种基于焦平面归一化响应特性且易于实现的非均匀性校正算法,并基于像元分布的卡方直方图提出一种新的图像非均匀性评估方法,即校正比例.该方法的校正输出考虑了每个像元的观测值与焦平面的响应信号的平均值,校正参量通过将像元的输出与其理想校正结果之间的偏差用焦平面响应的平均值建立联系而计算得到.提出的校正比例兼顾考虑了焦平面响应的时间与空间特性,比现有的图像非均匀性评估方法更能合理衡量焦平面的非均匀性程度.多种非均匀性校正的评价数据以及实验结果表明,该算法的校正效果优于两点校正法与原值拟合二阶校正法,并对于响应异常的像元具有较强的校正能力.此外其校正准确度高,所需参量少,易于实时处理,具有较强的实用价值.

关键词:红外焦平面阵列;非均匀性校正;卡方直方图;校正比例

中图分类号: TN216

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114006.0926

0 引言

由于红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA)探测器工艺水平难以达到设计理想均匀图像传感器的能力,其成像性能受非均匀性影响严重,实际应用中必须进行非均匀性校正^[1]. IRFPA非均匀性校正方法分为两大类:一类是基于参考源的标定校正,主要有一点温度定标法、两点温度定标法、多点温度定标法等;另一大类是基于场景的校正法,典型的有时域高通滤波法、恒定统计法、人工神经网络法等^[2-3].基于场景的校正算法具有计算量大、收敛速度慢、依赖场景的运动、难使用硬件实现等缺点.所以现在的热像仪校正还是以温度定标校正法为主^[4].

本文首先在红外焦平面非均匀性校正原理的基础上,分析了现有的基于定标非均匀性校正算法,并提出了一种基于焦平面归一化响应特性且易于实现的非均匀性校正算法;然后对现有的非均匀性评价标准进行分析并提出了一种基于像元卡方直方图的非均匀性校正评估方法,分析实验数据与所得的校正比例 r 可知,本文算法的线性校正性能上明显优于两点校正法,且本文算法的二阶校正效果也明显

好于原值拟合二阶校正法;最后,对本文算法校正异常响应像元的结果进行分析,表明本文的校正算法对异常像元具有较强的校正能力.

1 基于焦平面归一化响应特性且易于实现的非均匀性校正算法

传统的基于参考源的非均匀性校正算法考虑红外探测器的响应电信号与入射红外辐射功率(或黑体温度)是单调递增的连续函数关系.由于各个像元的响应函数存在差异,所以对于相同的入射辐射功率,各像元产生的响应电压不尽相同,产生了非均匀输出.为了校正焦平面的非均匀性,最直接的想法就是求取每个像元响应函数的逆映射,即由测得的像元的响应电压估计出射红外辐射功率,再由整个焦平面的平均响应函数作为每个像元响应函数来校正得到最后的校正输出.

但在实际的应用中,入射红外辐射功率(或黑体温度)测量准确度难以保证,且考虑到标定过程的简单化,所以尽量避免直接测量红外辐射功率(或黑体温度).由此,两点校正(Two Point Correction, TPC)算法假设各像元的响应函数在所感兴趣的温度范围内是线性的,在时间上是稳定的,在响应函数

基金项目:兵器科技预研项目(No. 30404010103)、近程高速目标探测技术国防重点科学实验室和国防预研项目(No. 40405030103)资助

第一作者:左超(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为红外图像信号处理. Email:surpasszuo@163.com

导师(通讯作者):陈钱(1964-),男,教授,主要研究方向为光电探测与信号处理. Email:chenq@mail.njust.edu.cn

收稿日期:2010-12-03;修回日期:2011-03-04

线性假设的前提下,可以在推导过程中消去辐射功率,所以计算参量时可以用响应电压的测量代替辐射功率的测量。

分段线性校正法则考虑了实际探测单元对红外辐射信号响应的非线性性,即都有一个由截止到饱和的状态,响应曲线一般要经历由截止到缓慢上升、线性增长直到趋于饱和这样的 S 型曲线变化过程^[5],所以将焦平面的工作范围分成若干子区间,在每个子区间采用两点法进行校正,提高了校正的准确度,但是也大大增加了校正的参量与算法实施的复杂度。

考虑到红外焦平面响应的非线性性与分段线性校正的不足,石岩将各像元的响应函数用入射红外辐射功率的二次多项式等表示^[6],但由于二次函数的反函数形式较为复杂,难以在校正过程中消去辐射功率,虽然可以通过最佳平方逼近简化校正公式,但是校正时必须测量入射红外辐射功率,给校正过程带来了许多不便且会引入额外的测量误差。

考虑到利用辐射功率来衡量焦平面像元响应的缺点与不便 Schulz M 等利用辐射功率来衡量焦平面像元响应的缺点与不便,提出了采用归一化响应特性来描述焦平面的平均响应^[7]

$$R(\langle y \rangle) = \langle y \rangle \quad (1)$$

式中 $\langle y \rangle$ 为焦平面响应的平均值。由于红外焦平面阵列像元数目在 10^4 到 10^5 数量级,由归一化响应特性描述焦平面的平均响应所得到的校正公式的准确度要优于采用辐射功率描述的校正公式。采用式(1)进行非均匀性校正,则只需要通过在若干个定标温度点,通过拟合插值建立 $\langle y \rangle$ 与每个像元的响应值 y_i 的关系 $y_i = F_i(\langle y \rangle)$,再代入式(1)即可求得最后的校正结果

$$y_i^c = R(\langle y \rangle) = \langle y \rangle = R(F_i^{-1}(y_i)) \quad (2)$$

由归一化响应特性描述焦平面的平均响应的非均匀性校正,其关键在于如何通过定标点来建立 $\langle y \rangle$ 与每个像元的响应值 y_i 的关系 $y_i = F_i(\langle y \rangle)$,Schulz M 等将每个像元的响应值 y_i 与焦平面的平均响应之差用 $\langle y \rangle$ 的多项式表示^[6]

$$\Delta y_i = y_i - \langle y \rangle = \sum_{j=0}^n a_{ij} \langle y \rangle^j \quad (3)$$

整理可得

$$y_i = F_i(\langle y \rangle) = \langle y \rangle + \sum_{j=0}^n a_{ij} \langle y \rangle^j \quad (4)$$

代入式(2),可以得到最后的校正公式

对于偏置(单点)校正

$$y_i^c = y_i - a_{i0} \quad (5)$$

对于线性(两点)校正

$$y_i^c = \frac{y_i - a_{i0}}{1 + a_{i1}} \quad (6)$$

对于二次曲线拟合(最小二乘)校正

$$y_i^c = -\frac{1 + a_{i1}}{2a_{i2}} + \sqrt{\frac{(1 + a_{i1})^2}{4a_{i2}^2} + \frac{y_i - a_{i0}}{a_{i2}}} \quad (7)$$

由其校正公式可知,对于偏置,线性校正,其校正公式是经典的单点校正,两点校正的变形。校正阶数为二阶的情况,校正公式十分复杂且带有平方根运算,难以采用硬件实时实现。为了简化校正公式,王瑞忠等将每个像元的响应值 y_i 与焦平面的平均响应之差用 y_i 的多项式表示^[8]

$$\Delta y_i = y_i - \langle y \rangle = \sum_{j=0}^n b_{ij} y_i^j \quad (8)$$

从而,校正公式可以简化为

$$y_i^c = y_i - \sum_{j=0}^n b_{ij} y_i^j \quad (9)$$

这种方法虽然简化了校正公式,但是由于实际探测器每个像元的响应值 y_i 是含有时域瞬态噪音的,在特别在校正阶数为一阶以上时,改校正公式会对噪音有放大作用,得不到稳定的校正结果。

本文考虑基于归一化响应特性进行红外焦平面非均匀性校正的优越性以及现有算法的缺点,提一种新的校正方法。由式(3)和(8)可知,在校正时,校正图像经过多帧累加,可以忽略系统的瞬态噪音,则 Δy_i 即可以认为是该像元固定图案噪音,大部分受该像元的非均匀性影响。式(3)是将焦平面每个像元的非均匀性利用理想校正结果的多项式来表示,式(8)是将焦平面的非均匀性利用原始响应的多项式来表示。考虑非均匀性的产生原因可知,探测单元的工作温度,入射辐射的强度变化,光学系统引入的背景辐射等内外界特性均可对焦平面器件的非均匀性产生影响。而这些因素最直接地反映在焦平面的响应信号的平均值 $\langle y' \rangle$ 。为了校正焦平面的非均匀性且简化校正公式,可将像元的输出与其理想校正结果之间的偏差用 $\langle y' \rangle$ 的多项式表示出来

$$\Delta y_i = y_i - \langle y \rangle = \sum_{j=0}^n c_{ij} \langle y' \rangle^j \quad (10)$$

注意在标定温度点下,焦平面的平均值与其理想校正结果是一致的,即 $\langle y \rangle = \langle y' \rangle$,所以 $a_{ij} = c_{ij}$,结合式(10)得校正公式

$$y_i^c = y_i - \sum_{j=0}^n c_{ij} \langle y' \rangle^j \quad (11)$$

从式(11)提供的校正公式中不难发现,该方法的线性校正,每个像元仅仅需要 1 次乘法,2 次加/减法,仅仅比经典的两点校正多一次减法运算。而二次校正,每个像元也仅仅需要 4 次乘法,3 次加/减法即可实现。所以通过式(11)来校正红外焦平面的非均匀性,即简化了运算过程,又可以得到稳定的校正结果。

2 校正评价标准及校正比例

2.1 现有非均匀性评价标准与分析

对于红外焦平面阵列的非均匀性,目前还没有一个国际统一的非均匀性定义和度量方法,不同的定义侧重点不同,往往只反映某一方面的特性或比较适合系统的某些指标要求. 国标定义红外焦平面阵列的非均匀性为在均匀入射辐射下,焦平面阵列像元输出值的均方误差与输出平均值的百分比^[9].

$$U = \frac{1}{\bar{V}} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [V_{ij} - \bar{V}]^2} \quad (12)$$

式中 V_{ij} 为焦平面上第 i 行,第 j 列所对应像元的输出值, \bar{V} 为焦平面上所有有效像元的图像平均值, M 和 N 分别为行数和列数, d 为死像元数, h 为过热像元数.

Schulz M 利用红外热成像系统输出图像的空间固定图案噪声与的时域瞬态噪声之间的关系,衡量校正后图像的非均匀性残余情况,提出了校正能力 c . c 可由式(13)计算得到^[7,10]

$$c = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (y_{ij}^c - \langle y_j \rangle)^2}{(N-1) \cdot M \cdot \sigma_{Tn,j}}} - 1 \quad (13)$$

式中 N 代表焦平面总的像元数, M 为待评价的不同温度的黑体背景数,对于单幅均匀背景图像情况 $M=1$, $\langle y_j \rangle$ 为第 j 个温度焦平面响应信号的平均值, y_{ij}^c 为对应第 j 个温度黑体背景下的标号为 i 的像元校正后的输出信号. $\sigma_{Tn,j}$ 代表第 j 个温度黑体背景下 σ_{Tn} 的取值,其中 σ_{Tn} 可由式(14)与(15)计算得到

$$\sigma_{Tn}^2 = \frac{\sum_{k=1}^S \sigma_{Tn,k}^2}{S-1} \quad (14)$$

$$\sigma_{Tn,k}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_{ik} - \langle y_i \rangle)^2}{N-1} \quad (15)$$

式(14)中的 S 表示短时间内观测所采集的连续帧数,式(15)中的 N 表示像元总数.

2.2 基于 χ^2 直方图的非均匀性评估方法

国标的非均匀性定义只采用单幅图像作为评价依据,没有考虑时域瞬态噪声的强弱对非均匀性标定与测定的影响. 校正能力 c 在评价非均匀性校正算法的校正效果时,尽管能定量计算出图像整体非均匀性校正效果,即校正后整个图像的残余固定图案噪声的水平. 但是却很难校正后的像元统计特性作出定量判断与直观评价. 所以本文提出了一种新的非均匀性评估方法:校正比例 r .

红外热成像系统输出图像的噪声可以分为空间固定图案噪声与的时域瞬态噪声. 理想的红外热成像系统输出应在较大的场景动态范围内,都能将固

定图案噪声控制在时域瞬态噪声的水平以下. 红外热成像系统输出图像的瞬态噪声符合高斯分布,整个红外焦平面的时域瞬态噪声可由式(14)计算得到. 对于均匀黑体图像,校正后整个焦平面像素连续 S 帧内的响应,如果忽略固定图案噪声,则式(16)应符合自由度为 $S-M$ 的 χ^2 分布^[7,10]. 其中 M 为所用校正参量的个数.

$$\chi_j^2 = \sum_{i=1}^S \frac{(y_{ij}^c - \langle y_i \rangle)^2}{\sigma_{Tn,j}^2} \quad (16)$$

利用整幅图像的所有像元作为样本,定义卡方直方图

$$\text{Hist}_{\chi^2}(X) = N_{[\chi^2]=X} \quad X \in 0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

式中 N 代表焦平面总的像元数,由于各图像的卡方值非离散,所以式(17)中要进行取整运算. $N_{[\chi^2]=X}$ 表示整幅图像卡方值取整后等于 X 的像元数. 由于残余固定图案噪声的影响,整个焦平面像元的响应分布会偏离理想的卡方分布,如果受固定图案噪声影响很大的像元比例较大,则会在卡方直方图中表现为一个很长的拖尾. 利用卡方直方图可以很直观地看出校正后的无效像元残余程度. 选取卡方直方图的 $\alpha=0.01$ 上分位点,定义校正比例 r 为

$$r = \frac{\int_0^{\chi_\alpha^2} [\text{hist}_{\chi^2}(x)] dx}{N} \approx \frac{\sum_{X=0}^{[\chi_\alpha^2]} \text{Hist}_{\chi^2}(X)}{N} \quad (18)$$

式中 N 代表焦平面总的像元数,如果考虑无效像元则式(18)可化为

$$r = \frac{\int_0^{\chi_\alpha^2} [\text{hist}_{\chi^2}(x)] dx}{N-d} \approx \frac{\sum_{X=0}^{[\chi_\alpha^2]} \text{Hist}_{\chi^2}(X)}{N-d} \quad (19)$$

式中 d 代表焦平面无效像元总数. r 的值大小不但可以反映焦平面空间固定图案噪声水平,而且具有更直观的意义:即整个焦平面中被校正为正常响应像元的数目占总像元数的大致比例. 所以很容易理解,当 r 的值越接近于1,则整个焦平面的响应越均匀,图像的残余空间固定图案噪声越低.

3 实验结果及数据分析

采用 HgCdTe 中波 (3.7~4.8 μm)、640×512 IRFPA(积分时间 10 ms)来测试校正结果,实验采用了 280 K~320 K 的 6 组黑体图像进行定标,获取由探测器驱动电路 14 位 AD 输出的原始图像数据,在同一黑体温度点记录 20 帧图像来消除时域瞬态噪声. 待校正图像为 300 K 黑体图像与两幅景物图像,其探测器原始输出图像见图 1. 由原始图像可以看出,校正前焦平面受非均匀性影响比较严重,景物难以辨别,图像整体中间暗四周亮. 待校正图像分别经由经典的两点校正法,王瑞忠的二阶校正算法(原

值拟合),与本文算法的线性校正,二阶校正法进行校正.其中两点校正选取 280 K 与 320 K 两温度下的黑体.300 K 黑体图像经过各算法校正后的图像与对应卡方直方图见图 2 与图 3,卡方直方图选取连续 8 帧图像计算.表 1 中列出了校正前图像($n=1$),以及经过两点法校正($n=2$),原值拟合二阶校正($n=4$),与本文算法的线性校正($n=3$),二阶校正($n=5$)的残余非均匀性 U ,校正能力 c 与校正比例 r .

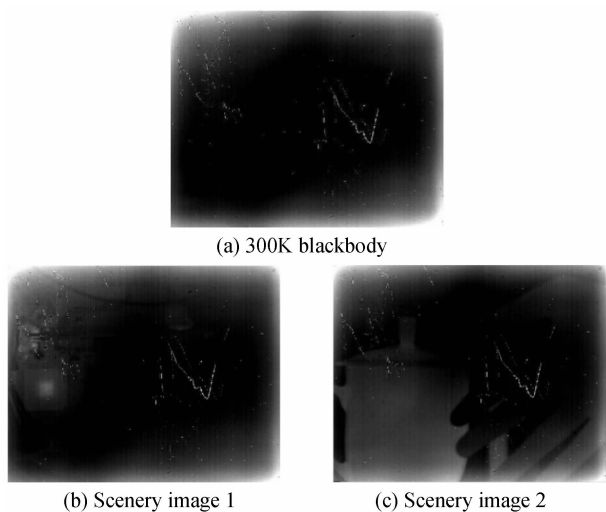


图 1 待校正原始图像
Fig. 1 The raw images to be corrected

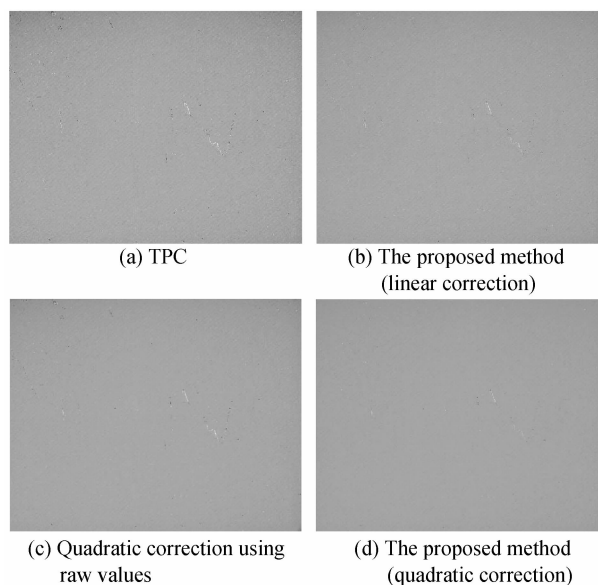
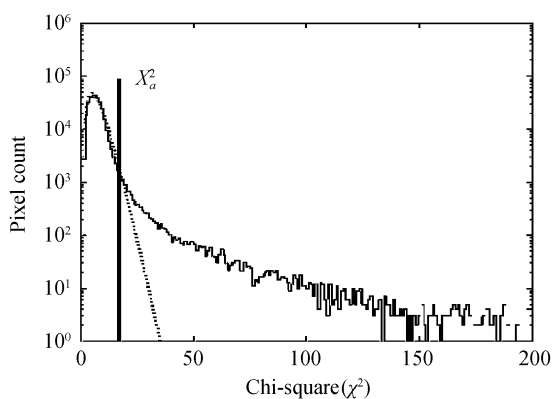


图 2 300 K 黑体校正图像
Fig. 2 The corrected images of 300 K blackbody

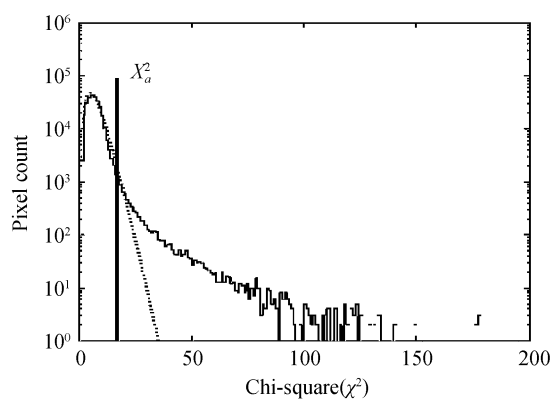
表 1 300 K 黑体校正图像评价

Table 1 The evaluations of 300 K blackbody image

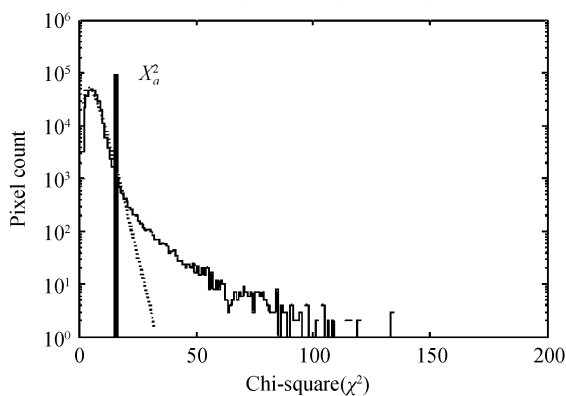
n	U	c	r
1	142.672 5	641.986 5	0.051 4
2	0.111 1	2.854 3	0.973 2
3	0.023 0	1.241 3	0.980 2
4	0.019 9	1.187 8	0.983 0
5	0.008 1	0.678 2	0.991 5



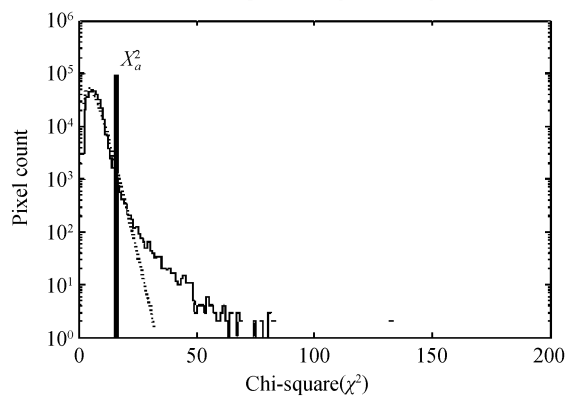
(a) The chi-square histogram of Fig.2 (a)



(b) The chi-square histogram of Fig.2 (b)



(c) The chi-square histogram of Fig.2(c)



(d) The chi-square histogram of Fig.2(d)

图 3 图 2 所示各图像对应的卡方直方图
Fig. 3 The chi-square histograms of Fig. 2

由图 2,图 3 与表 1 可以看出:

1)由于焦平面响应的非线性,图像经过二阶校正的结果要优于一阶校正方法.

2)图像经过两点法校正后,非均匀性已经得到较大改善,但是部分响应率偏低或者偏高的像元,不能得到正确校正而显示过暗或者过亮.且整幅图像的异常像元校正后显得十分突出,这些异常像元导致其卡方直方图偏离理想较大.此外图像仍然残余较大的通道非均匀性与斜纹固定图案噪声.而经本文算法线性校正后,大部分异常像元经过校正后的响应已经得到控制,图像的卡方直方图也向左侧收敛了许多,通道非均匀性与斜纹固定图案噪声相比图 1(a)略轻.

3)经过王瑞忠的二阶校正算法校正后的图像,通道非均匀性与斜纹固定图案噪声已经得到很大改观,但是仍有部分异常像元仍然不能得到很好的校正.经过本文算法最小二乘校正后的整幅图像响应均匀,过亮与过暗像元都得到了很好的抑制,卡方直方图中大部分像元分布已经收敛到 $\alpha=0.01$ 上分位点范围内,与理想分布曲线十分接近.

4)本文算法校正后图像的残余非均匀性 U ,校正能力 c 与校正比例 r 要优于两点法与原值拟合二阶校正法.且经过本文算法二阶校正后,图像的残余非均匀性已经达到非常低的水平, c 已经降到了 1 以下,而且超过 99%的像元响应达到了较为理想的响应水平.

常见的非均匀性定义和度量方法一般都是基于均匀辐射的前提下.对于非均匀辐射的情况下,图像的非均匀性一般很难通过计算得到,此时最直观的方法就是主观观测法.两幅景物图像经过各算法校正后的图像与参量见图 4 和图 5.

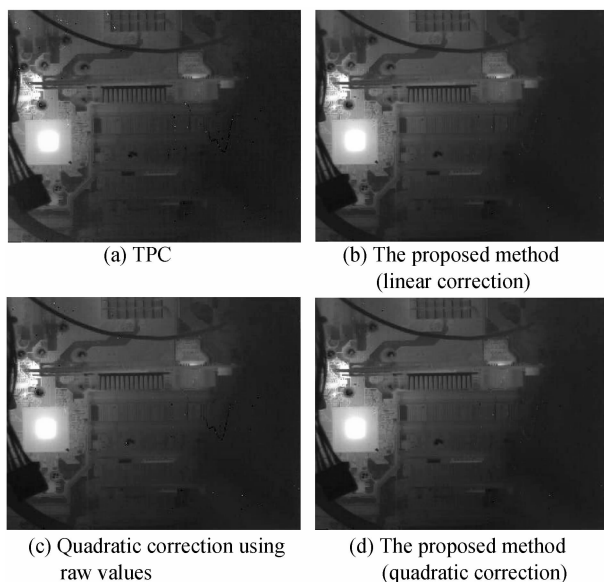


图 4 景物 1(电脑主板)校正图像

Fig. 4 The corrected images of a PC main board

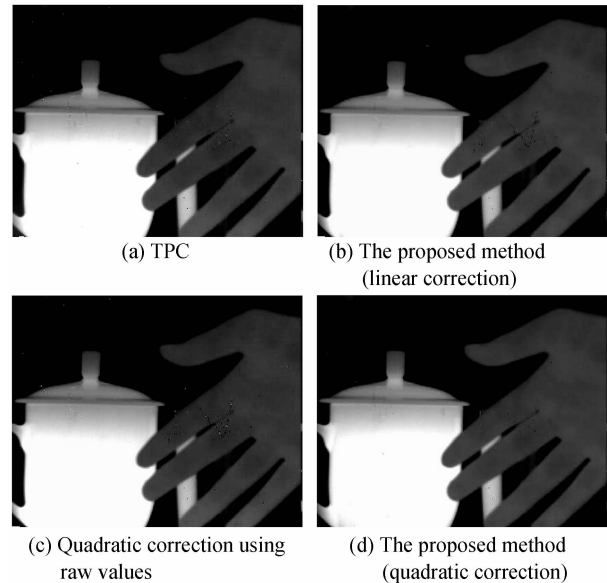


图 5 景物 2(手与茶杯)校正图像

Fig. 5 The corrected images of a hand and a cup

表 2 和表 3 中列出了两幅景物图像的校正前图像($n=1$),以及经过经典两点校正($n=2$),最小二乘二阶拟合校正($n=4$),与本文算法的两点校正($n=3$),原值拟合二阶校正($n=5$)后图像的均值与标准差.由实验结果可知,本文算法校正后的图像均值能够稳定保持原焦平面响应信号的平均水平,且输出图像的标准差 σ 较小.图像的残留固定图案噪声低于经典算法的校正结果,获得良好的视觉观测效果.

表 2 图 4 所示景物 1 图像均值与标准差

Table 2 The means and standard deviations of Fig. 4

n	$\langle y \rangle$	σ
1	6 372	940.664 2
2	6 395	133.867 2
3	6 372	133.452 5
4	6 391	133.267 5
5	6 372	132.893 1

表 3 图 5 所示景物 2 图像均值与标准差

Table 3 The means and standard deviations of Fig. 5

n	$\langle y \rangle$	σ
1	6 425	923.840 3
2	6 424	153.130 2
3	6 425	152.116 8
4	6 424	152.091 3
5	6 425	151.973 2

4 异常像元的校正与分析

异常像元种类主要包括:直流电平像元,响应率异常像元,受 $1/f$ 噪音的影响较大的噪音像元等.这些响应异常的像元的校正通常由非均匀性校正与盲元补偿算法共同完成.选取行列标号为(1,4)的直

流电平像元, (49, 253) 的弱响应率像元, (130, 506) 的 $1/f$ 噪音像元来分析算法的校正效果. 像元的温度响应曲线与焦平面的平均响应曲线如图 6, 由两点校正法与本文算法线性校正结果如表 4.

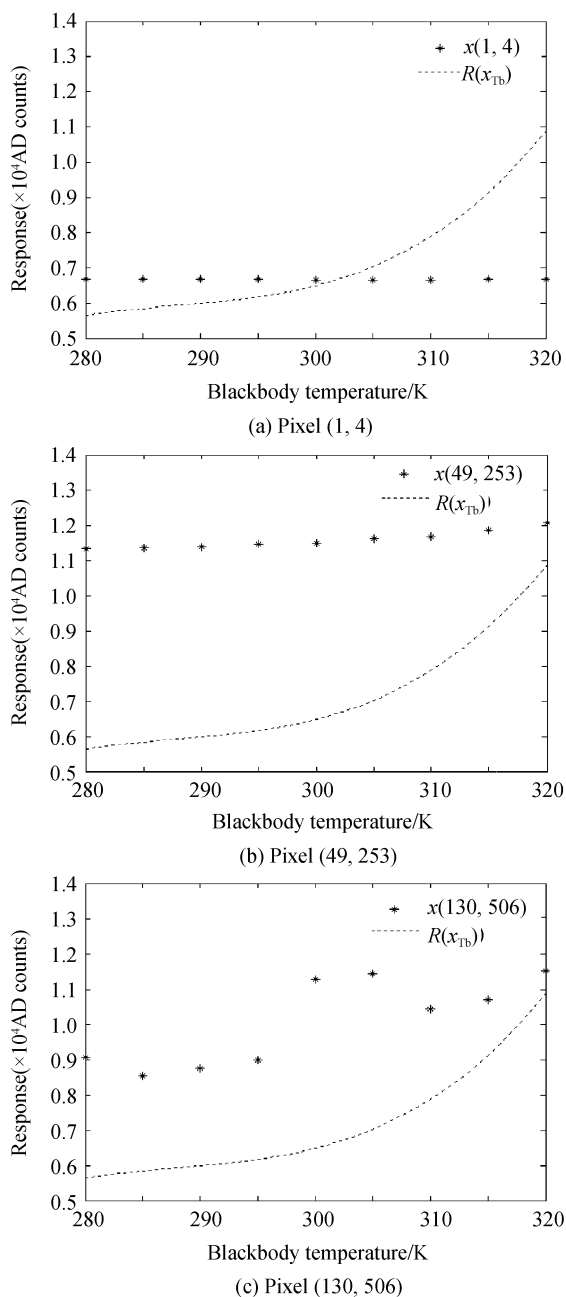


图 6 异常像元的响应

Fig. 6 The responses of abnormal pixels

表 4 异常像元的校正结果

Table 4 The correction results of abnormal pixels

	(1, 4)	(49, 253)	(130, 506)
y	6 657	11 442	9 982
$\langle y \rangle$	6 239	6 239	6 239
y_1'	12 150	6 187	8 261
y_2'	6 239	6 241	7 232

由表 4 的数据分析可知, 本文算法对异常像元有着较强的校正能力, 校正结果明显优于两点校正

法. 对于直流电平的像元, 本文算法具有“伪校正”效果, 即像元校正后的输出接近焦平面的理想响应曲线, 而经过两点校正后, 像元的输出会出现奇异值, 形成暗点或亮点. 对于响应率异常的像元, 本文算法能够得到比经典的两点校正算法更为接近理想输出的结果. 而对于受 $1/f$ 噪音影响较大的噪音像元, 一般很难通过均匀性校正算法对其进行校正, 本文算法与两点法的结果均偏离理想值较大.

5 结论

本文考虑了校正准确度与算法实施的复杂度, 提出了一种基于焦平面归一化响应特性且易于实现的非均匀性校正算法, 并基于像元分布的卡方直方图提出一种新的图像非均匀性评估方法——校正比例 r . 通过多种非均匀性校正的评价方法以及对异常像元的校正分析, 本文算法在同等阶次与相同校正参量的前提下, 校正效果明显优于经典的两点校正与原值拟合二阶校正法, 对于响应异常的像元具有较强的校正能力. 此外, 此算法运算量小, 校正参量与阶次可以灵活调整, 易于硬件实现等优点使其在实际工程中易于实时处理, 具有良好的应用前景.

参考文献

- [1] MILTON A F, BARONE F R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance [J]. *Optical Engineering*, 1985, **24**(5): 855-862.
- [2] ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guo-hua, et al. New temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter[J]. *Optical Review*, 2011, **18**(2): 197-202.
- [3] ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guo-hua, et al. Scene-based nonuniformity correction algorithm based on interframe registration[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, **28**: 1164-1176.
- [4] YIN Shi-min, XIANG Li-bin, ZHOU Jin-song, et al. Research on nonuniformity 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.
- [5] WANG Yue-ming, CHEN Jian-xin, LIU Yin-nian, et al. Study on Two-Point Multi-section IRFPA nonuniformity correction algorithm[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, **22**(6): 415-418.
王跃明, 陈建新, 刘银年, 等. 红外焦平面器件二点多段非均匀性校正算法研究[J]. *红外与毫米波报*, 2003, **22**(6): 415-418.
- [6] SHI Yan, ZHANG Tian-Xu, LI Hui, et al. New approach to nonuniformity correction of IRFPA with nonlinear response [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, **23**(4): 251-256.
石岩, 张天序, 李辉, 等. 一种考虑红外焦平面器件非线性响应的非均匀性校正方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(4): 251-256.
- [7] SCHULZ M, CALDWELL L. Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1995, **36**(4): 763-777.

- [8] WANG Rui-zhong, CHEN Pei-yi, TSIEN Peih-sin. An improved nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays which is easy to implement[J]. *Infrared Physics & Technology*, 1998, **39**(1): 15-21.
- [9] 上海技术物理研究所. GB/T 17444. 红外焦平面阵列特性参量测试技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [10] GROSS W, HIERL T, SCHULZ M. Correctability and long-term stability of infrared focal plane arrays [J]. *Optical Engineering*, 1999, **38**(5): 862-865.

Nonuniformity Correction Based on Unified Photoresponse Characteristics of Infrared Focal Plane Arrays

ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guo-hua

(National Defense Key Laboratory of Optoelectronic Engineering, Nanjin University of Science & Technology, Nanjing, 210094 China)

Abstract: The nonuniformity in the infrared focal plane array limits the quality of infrared imaging system. A new nonuniformity correction procedure based on the unified photoresponse characteristics of infrared focal plane arrays and the correction ratio based on the chi-square histogram were presented. The correction output of each detector took both its observed value and the average response of the focal plane array into account. The correction parameters were obtained by establishing the relationship between the difference of the observed value and its ideal response and the average response of the focal plane array. The proposed correction ratio took into account of both spatial and temporal response characteristics of focal plane arrays, thus it gave more reasonable results on the measurement of the degree of nonuniformity. Experimental results show that its performance is better than that of the two-point correction and the quadratic curve fitting correction using the input values, and has excellent correction capability to the pixels with abnormal responses. In addition, the algorithm has the advantages of high correction precision, less correction factors and easy to real-time processing, which enhances its utility value.

Key words: Infrared focal panel array; Non-uniformity correction; Chi-square histogram; Correction ratio