

文章编号:1001-9014(2006)05-0372-05

弱目标检测系统中红外焦平面阵列 非均匀性校正算法的研究

吴健飞, 李范鸣, 庄良, 李争
(中国科学院上海技术物理所, 上海 200083)

摘要:提出了一种在弱目标检测系统中, 线列或面阵红外焦平面的非均匀校正算法—基于可变积分时间和均衡噪声的两点现场校正算法. 该算法充分结合了基于标定的校正算法和基于景象的校正算法的优点, 考虑了焦平面阵列在不同积分时间下暗电流的变化, 有效地均衡了各探测单元的噪声影响, 使目标的信噪比达到了最佳效果. 实验结果表明该方法在校正性能和对弱目标的提取能力上要明显优于两点校正算法.

关键词: 红外焦平面阵列; 非均匀性; 线性校正; 可变积分时间和均衡噪声.

中图分类号: TM **文献标识码:** A

STUDY ON IRFPA NONUNIFORMITY CORRECTION IN DIM TARGET DETECTION SYSTEM

WU Jian-Fei, LI Fang-Ming, ZHUANG Liang, LI Zheng

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A new method, named 'two point IRFPA nonuniformity correction method based on integration adjustment and noise equilibrium', to correct IRFPA nonuniformity in dim target detection system was presented. This method fully takes advantages of both demarcate-based and scene-based IRFPA nonuniformity correction methods. By considering dark current variance and noise characteristics of every detector cell into consideration, this method gives optimal S/N performance. Experiment results show that its performance is more perfect than that of two-point correction algorithm.

Key words: IRFPA; nonuniformity; linear correction; integration adjustment and noise equilibrium

引言

由于受材料和制造工艺等原因限制, 红外焦平面阵列(IRFPA)各探测单元之间普遍存在着非均匀性, 在弱目标检测系统中, 其影响尤为突出. 目前, 国内外对红外焦平面阵列的非均匀校正算法主要有: 基于标定的校正算法和基于场景的校正算法. 基于标定的校正算法主要有两点校正算法、多点校正算法、以及两点多段校正算法^[1-3]; 基于场景的校正算法主要有恒定统计平均算法、神经网络的算法、Kalman 滤波算法^[4-8].

本文在分析红外探测器非均匀性产生的原因的基础上, 提出了基于可变积分时间和均衡噪声的两

点现场校正算法. 实验结果表明该方法在校正性能和对弱目标的提取能力上要明显优于两点校正算法.

1 非均匀性产生机理

根据 Mooney 理论, 单个探测元对绝对温度为 T 的黑体辐射的输出响应为:

$$N_i(T) = C_0 A_i \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \eta_i(\lambda) d\lambda + r_i + n_i, \quad (1)$$

$$C_0 = \frac{t\pi\epsilon}{4(f/\#)^2}, \quad (2)$$

上式中, $L(\lambda, T)$ 的黑体在波长 λ 处的光谱光子辐射; $\eta_i(\lambda)$ 为第 i 个探测元在波长 λ 处的量子效率;

收稿日期: 2005-12-21, 修回日期: 2006-06-18

基金项目: 国防预研项目(050503)

作者简介: 吴健飞(1979-), 男, 浙江义乌人, 助理研究员, 硕士研究生, 主要研究方向: 红外成像、图像处理.

Received date: 2005-12-21, revised date: 2006-06-18

λ_1 、 λ_2 分别是系统截止波长的下限和上限; A_i 为第 i 元的有效光敏面积; t 为大气透射比; r_i 为第 i 元暗电流在一个有效积分时间内聚集的电荷数; n_i 为第 i 元的随机噪声; $f/\#$ 是光学系统的 F 数;

受目前器件材料制造和工艺水平的限制,各个探测元之间的 $\eta_i(\lambda)$ 、 A_i 、 r_i 和 n_i 参数存在不一致,是引起非均匀性的主要原因。以往的非均匀校正方法主要针对 $\eta_i(\lambda)$ 、 A_i 的非均匀性,而本文在此基础上,更充分考虑了变积分时间情况下暗电流噪声的变化,以及对随机噪声 n_i 的均衡,因此可以获得更好的校正效果。(另外,与外界输入相关的非均匀性如光学系统的非均匀性、光机扫描系统的非均匀性以及时域噪声的影响等也是引起探测器非均匀性的重要原因。)

2 基于可变积分时间和噪声均衡的两点现场校正算法

这个算法分为 3 个步骤:如下 2.1 和 2.2 主要是用来计算探测器各探测元的校正参数;2.3 为在红外成像系统现场应用中对所计算出来的各元校正参数进一步优化。

2.1 可变积分时间

在实际工程应用中,由于系统经常需要改变红外探测器的积分时间,因此改变积分时间对红外探测器非均匀性的影响成了一个值得考虑的问题。式(1)中, r_i 为在单个有效积分时间内暗电流聚集的电荷数,且对不同的探测器单元,随积分时间的变化, r_i 的变化量并不相同。因此,当改变积分时间后,先前的校正参数并不能有效的校正红外探测器输出的非均匀性。对此可以采用一种比较简单而行之有效的办法:对每个常用的积分时间,都使用一组与之对应的非均匀校正参数。

2.2 噪声均衡

在弱目标检测系统中,系统的噪声是引起虚警的主要原因;而由于噪声的存在,不得不把潜目标提取算法中的阈值抬高,从而有可能导致真实目标未能被捕获,因此,系统的噪声也是引起漏警的一个很重要的因素。所以,在非均匀校正参数计算的过程中,应该考虑校正参数对系统噪声的影响。对于两点校正算法,其影响主要体现在增益系数 k 上,当增益系数 k 大于 1,就会对系统噪声产生放大作用。如果某一探测元的噪声经过这一元的校正参数校正后将被放大到足以影响系统捕获目标的性能,则宁可稍微减小这一元的增益系数损失一点其均匀性,以减

小噪声对目标检测的影响。

然而,目前弱目标检测系统中,对目标的识别算法主要是检测目标辐射 ϕ_t 与邻近背景辐射 ϕ_b 的差异。如果为了减小噪声的影响而一味的减小增益值,将会使探测器对外界辐射响应灵敏度降低,导致目标辐射和背景辐射的响应差值减小,从而出现漏警现象。对于噪声很小的探测单元,可以稍微增加其增益系数以提高对外界辐射的响应灵敏度。

从某种意义上来说,这种算法相当于把所有探测元的噪声影响均衡了一下,在噪声和灵敏度之间求得一个平衡,从而很大程度上提高弱目标检测系统探测目标的性能。

结合 2.1、2.2,具体的校正算法如下:

(1) 确定系统所要用的积分时间。设为 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_p$ $P+1$ 个积分时间。在第 p ($p=0, 1, 2, \dots, P$) 个积分时间下,在动态范围内选取 ϕ_0, ϕ_1, ϕ_2 3 个标定点。 ϕ_0 应靠近动态范围的低端, ϕ_2 应靠近动态范围的高端,而 ϕ_1 则应位于动态范围的中部。

(2) 确定探测器中存在的坏元。选定一个积分时间 $p = [P/2]$, 在 ϕ_0 和 ϕ_1 (也可选 ϕ_2) 标定点对 N 个探测单元进行标定,得到每个探测单元对应的响应为: $S_{[p/2],j}(\phi_0)$ 和 $S_{[p/2],j}(\phi_1)$ ($j=1, 2, 3, \dots, N$)。考察每个探测单元的两个响应值,当第 j 个探测元的响应值 $S_{[p/2],j}(\phi_0)$ 和 $S_{[p/2],j}(\phi_1)$ 相差很大或者相差很小,则视为响应异常,标记第 j 个探测元为坏元,并存储在一个坏元表 B 中。

(3) 在第 p ($p=0, 1, 2, \dots, P$) 个积分时间下,在 ϕ_0, ϕ_1 和 ϕ_2 三个标定点对坏元表 B 外的每个探测单元进行连续多次标定(求平均以减小随机噪声的影响,并且从中求得各元随机噪声:可以计算每个探测元的多次标定值的均方根噪声)。得到每个探测单元对应的响应平均值为: $S_{p,j}(\phi_i)$ ($i=0, 1, 2; j=1, 2, 3, \dots, N; p=0, 1, 2, \dots, P$); 随机噪声为: $n_{p,j}(\phi_i)$ ($i=0, 1, 2; j=1, 2, 3, \dots, N; p=0, 1, 2, \dots, P$)。假定每个探测单元的响应是线性的,即:

$$S_{p,j}(\phi_i) = k_{p,j}\phi_i + b_{p,j} \quad (i=0, 1, 2; j=1, 2, 3, \dots, N; p=0, 1, 2, \dots, P) \quad (3)$$

$k_{p,j}$ 为增益系数, $b_{p,j}$ 为偏移系数。

先粗略的计算一下各元的校正参数:

$$k_{p,j} = \frac{\overline{S}(\phi_2) - \overline{S}_p(\phi_0)}{\overline{S}_{p,j}(\phi_2) - \overline{S}_{p,j}(\phi_0)}$$

$$b_{p,j} = \overline{S}_p(\phi_2) - k_{p,j}\overline{S}_{p,j}(\phi_2) \quad (j=1, 2, 3, \dots, N; p=0, 1, 2, \dots, P) \quad (4)$$

$$\bar{S}_p(\phi_2) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_{p,j}(\phi_2)$$

$$\bar{S}_p(\phi_0) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_{p,j}(\phi_0)$$

在式(4)中,为了从整个动态范围内计算校正参数,所以选取 ϕ_0 和 ϕ_2 两个表定点.

然后考察每一探测元在每个标定点处的噪声乘以增益系数 $k_{p,j}n_{p,j}(\phi_i)$,如图 1 所示把增益乘噪声过大的探测元标记为坏元(因为这些元将会严重的影响弱目标检测系统对目标的检测性能),并且补充到坏元表 B 中.

(4) 计算在坏元表 B 以外的所有探测元的噪声乘增益系数的平均值 $P_{p,j}(i=0,2, p=0,1,2 \dots P)$,如图 2 所示.由于 $n_{p,j}(\phi_0) \approx n_{p,j}(\phi_2)$,所以在后续的运算中把 $P_{p,j}$ 简化为 $P_{p,2}$ 来考虑.

(5) 修正各探测单元的增益系数和偏移系数.设对于每一探测单元,限定其增益系数的修正量为式(4)中所计算出来的增益系数 $k_{p,j}$ 的 2%,即 $\Delta k_{\max} = 0.02k_{p,j}$ (Δk_{\max} 为增益系数的修正量最大值);并且给定一个其增益乘噪声与增益乘噪声平均值 $P_{p,2}$ 的误差容限 ζ (ζ 通常和弱目标检测系统的潜目标提取算法中的阈值有关,也可以取一个比较小的值如增益乘噪声平均值的 1/2,即 $P_{p,2}/2$).对第 $j(j=1,2,3 \dots N)$ 探测元在标定点 ϕ_2 处对其增益乘噪声进行分析.当 $k_{p,j}n_{p,j}(\phi_2)$ 与 $P_{p,2}$ 的差值没有超过误差容限 ζ 即 $|k_{p,j}n_{p,j}(\phi_2) - P_{p,2}| \leq \zeta$ 时,则不对此元进行增益修正;反之,应对此元进行增益修正.修正的原则是在增益修正量不超过 Δk_{\max} 的前提下使修正后的增益乘噪声值尽量接近 $P_{p,2}$.修正方法如下:

a) 当 $k_{p,j}n_{p,j}(\phi_2) + \zeta < P_{p,2}$ 时:

修正后的增益值为:

$$k'_{p,j} = \begin{cases} k_{p,j} + \Delta k_{\max} & ((\Delta k_{\max} + k_{p,j})n_{p,j}(\phi_2) < P_{p,2}) \\ P_{p,2}/n_{p,j}(\phi_2) & ((\Delta k_{\max} + k_{p,j})n_{p,j}(\phi_2) \geq P_{p,2}) \end{cases} \quad (5)$$

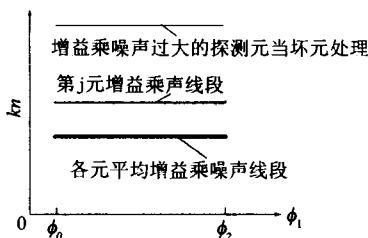


图1 增益乘噪声线段图
Fig.1 The chart of Plus multiply Noise.

$$b'_{p,j} = \bar{S}_p(\phi_1) - k'_{p,j}S_{p,j}(\phi_1)$$

$$\left(\bar{S}_p(\phi_1) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_{p,j}(\phi_1) \right),$$

在上式中, $b'_{p,j}$ 的计算选取 ϕ_1 的目的是为了使第 j 元增益修正后的响应曲线在 ϕ_0 和 ϕ_2 范围内尽量靠近其它元粗校曲线,从而使各探测元在动态范围内能够有比较一致的均匀性,如图 2 中(b)所示.第 j 元修正后的增益乘噪声效果如图 2 中(a)所示,第 j 元修正后的响应曲线如图 2 中(b)所示.

b) 当 $k_{p,j}n_{p,j}(\phi_2) - \zeta > P_{p,2}$ 时:

修正后的增益值为:

$$k'_{p,j} = \begin{cases} K_{p,j} - \Delta k_{\max} & (k_{p,j} - \Delta k_{\max})n_{p,j}(\phi_2) > P_{p,2} \\ P_{p,2}/n_{p,j}(\phi_2) & ((k_{p,j} - \Delta k_{\max})n_{p,j}(\phi_2) \leq P_{p,2}) \end{cases} \quad (6)$$

$$b'_{p,j} = \bar{S}_p(\phi_1) - k'_{p,j}S_{p,j}(\phi_1),$$

在上式中, $b'_{p,j}$ 的计算选取 ϕ_1 的目的是为了使第 j 元增益修正后的响应曲线在 ϕ_0 和 ϕ_2 范围内尽量靠近其它元粗校曲线,从而使各探测元在动态范围内能够有比较一致的均匀性,如图 2 中(d)所示.第 j 元修正后的增益乘噪声效果如图 2 中(c)所示,第 j 元修正后的响应曲线如图 2 中(d)所示.

(6) 在校正运算时,读入校正参数 $k_{p,j}, b_{p,j}(j=1,2,3 \dots N; p=0,1,2 \dots P)$.则第 j 元的校正响应值为:

$$S'_{pj} = k_{p,j}S_{pj}(\phi) + b_{p,j} \quad (7)$$

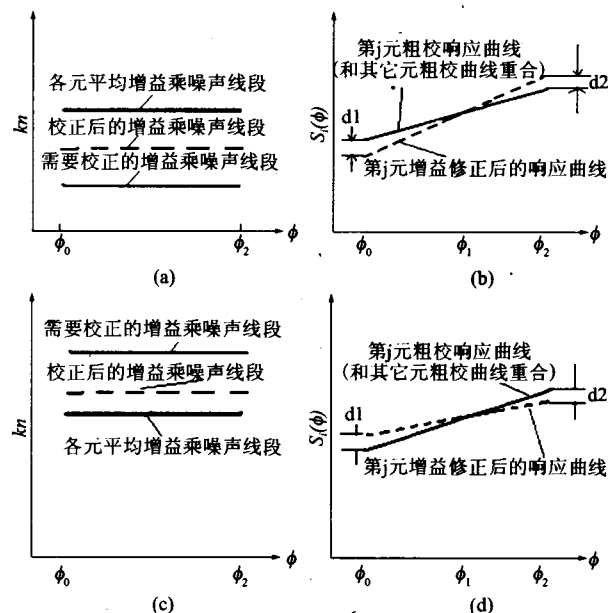


图2 校正原理
Fig.2 The principle of this method.

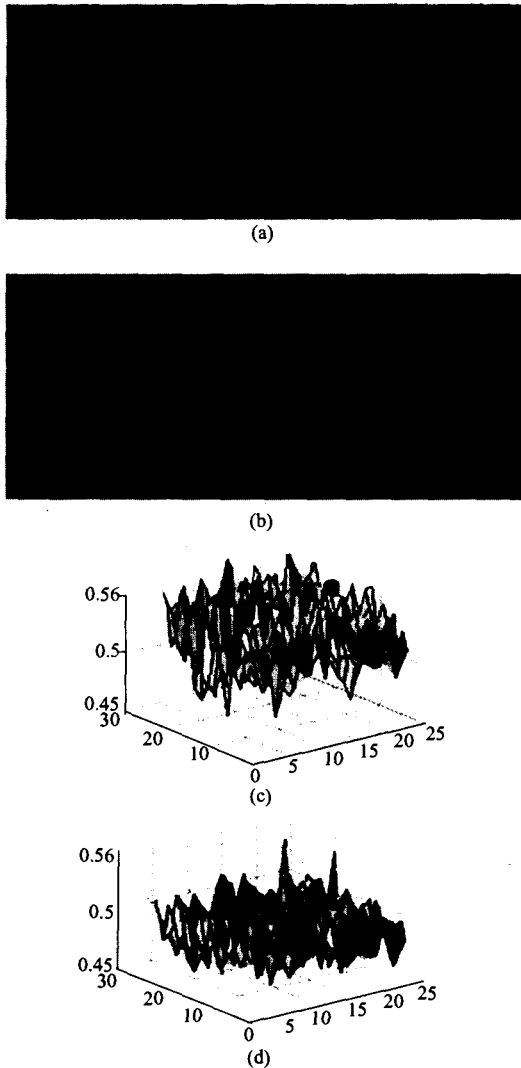


图3 算法校正效果图(a)两点校正算法校正后图像(b)本算法校正后的图像(c)两点校正算法校正后图像中目标所在区域的局部灰度图(d)本算法校正后图像中目标所在区域的局部灰度图

Fig. 3 Result of nonuniformity correction (a) corrected image using two - point correction method (b) corrected image using this method (c) local gray around the target in the corrected image using two - point correction method (d) local gray around the target in the corrected image using this method

2.3 现场校正

在上述计算中,由于考虑了噪声对弱目标检测系统目标提取的影响,使得探测器对均匀背景辐射的响应并不十分均匀,因此在系统现场应用中,必须对其进行进一步校正.这里,我们采用了一种现场一点校正的办法:

在现场选定一块比较均匀的背景(也可以用盖子盖住探测器镜头),在积分时间 p ($p=0,1,2\cdots P$) 下由式(7)得到各个探测元经校正参数修正后的输出 $S'_{pj}(\phi)$. 然后,我们对各元的校正参数进行进一

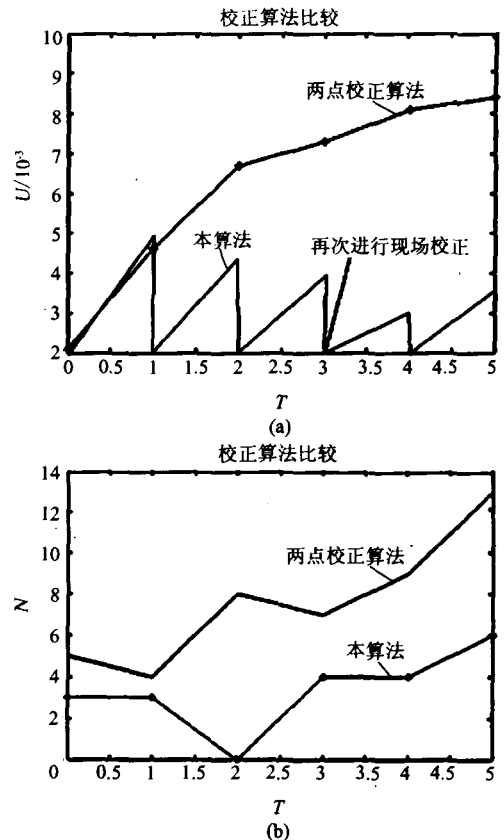


图4 本算法和两点校正算法效果比较图
Fig. 4 comparison of two correction method

步的修正,修正方法如下:

- a) 计算所有探测元输出的响应均值

$$\overline{S'_{p,j}(\phi)} = \sum_{j=1}^N S'_{p,j}(\phi) / N \quad (8)$$

- b) 对每一探测元的偏移系数进行修正:

$$b'_{p,j} = \overline{S'_{p,j}(\phi)} - S'_{p,j}(\phi) \quad (9)$$

而对增益系数,保持原来的 $k_{p,j}$. 这样我们在每个积分时间下得到了新的校正参数: $k_{p,j}$ 和 $b'_{p,j}$

这种现场校正方法使用比较灵活,其实就相当于对红外探测器的原始输出响应经式(7)粗校后再进行式(9)的精校,在现场应用中取得了很好的效果:如图3所示,图中红框中为距离为35公里的弱目标,(a)为用两点校正算法校正后的图像,(b)为用本算法校正后的图像,(c)为两点校正算法校正后图像中目标所在区域的局部灰度图,(d)为本算法校正后图像中目标所在区域的局部灰度图. 比较图(a)和图(b)可知,本算法的校正效果要优于两点校正算法;而比较图(c)和图(d)可知,本算法校正后的图像比两点校正算法校正后的图像在目标所在的局部区域,具有更高的信噪比.

3 结论

我们用红外实时成像系统在长时间内采集了大量的实景图像,对比了用本非均匀校正算法与两点校正算法的校正效果如图4所示。

由图4可看出,基于可变积分时间和均衡噪声的两点现场校正算法通过现场校正在很长的时间内仍能保持校正均匀性,并且有效的降低了虚警率。

另外值得一提的是,由于本算法在现场校正过程中只需修正偏移系数,所以具有运算量很小的特点,并且易于在硬件中实现,在弱目标检测系统中具有很好的应用前景。

REFERENCES

- [1] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan, CAO Zhi-Guo. Study on the property of spatial frequency of nonuniformity noise in irfpa and the improvement of spatial adaptive nonuniformity correction technique[J]. *J. Infrared Millim. Wave* (张天序, 石岩, 曹治国, 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, *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(5): 255—260.
- [2] SHI Yan, MAO Hai-Cen, ZHANG Tian-XU, et al. New approach of IRFPA non-effective pixel discrimination based on pixel s characteristics histogram analysis [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (石岩, 毛海芬, 张天序, 等, 一种新的基于特征直方图分解的红外焦平面阵列无效象元判别方法, *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(2): 119—124.
- [3] WANG Yu, CHEN Qian, YIN De-Kui, et al. Real-time non-uniformity correction technique for infrared image [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (王钰, 陈钱, 殷德奎, 等, 实时红外图像非均匀校正技术研究, *红外与毫米波学报*), 1999, **18**(2): 151—155.
- [4] WANG Yue-Ming, CHEN Jian-Xin, LIU Yin-Nian, et al. Study on two-point multi-section IRFPA nonuniformity correction algorithm [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (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, *红外与毫米波学报*) 2003, **22**(6): 415—418
- [5] JIANG Guang, LIU Shang-Qian. Adaptive nonuniformity correction of IRFPA [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (姜光, 刘上乾, 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法研究, *红外与毫米波学报*), 2001, **20**(2): 93—96.
- [6] SHI Yan, ZHANG Tian-Xu, LI Hui, et al. New approach to nonuniformity correction of IRFPA with nonlinear response [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (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, *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(4): 251—256.
- [7] Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M R, et al. Adaptive Nonuniformity Correction for IR Focal Plane Arrays Using Neural Networks [C]. *Infrared Sensors, Detectors, Electronics, and Signal Processing, SPIE*, 1999, **1541**: 100—109.
- [8] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1999, **8**(8): 1148—1151
- [9] Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E, et al. Scenebased nonuniformity correction using video sequences and registration [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(8): 1241—1250.