

基于三维噪声统计特性异常的盲元检测与分类

李秋明¹, 侯晴宇¹, 武春风², 逯力红¹, 张伟¹

(1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 哈尔滨 150001, houqingyu@126.com;

2. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 哈尔滨 150001)

摘 要: 根据对盲元特性的分析, 提出将三维噪声模型中的固定图形噪声与随机时空噪声作为盲元检测的数据源, 在像素等级上构建形成特征向量. 建立特征向量的独立二元正态分布统计模型, 将盲元看作是游离于正态分布等概率密度椭圆之外的异常点. 以特征空间中的统计距离与特征空间角作为异常点检测的统计判据, 并分类死元、过热像元与闪烁像元. 将该算法应用于实际制冷型红外焦平面的盲元检测, 实验结果证明了该算法的有效性.

关键词: 红外焦平面; 盲元检测; 统计距离; 特征空间角

中图分类号: TN214

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0037-04

Detection and classification of blind pixels based on statistical characteristic abnormality of 3D noise

LI Qiu-ming¹, HOU Qing-yu¹, WU Chun-feng², LU Li-hong¹, ZHANG Wei¹

(1. Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, houqingyu@126.com; 2. Dept. of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: According to the analysis on characteristics of blind pixels, a method of taking the fixed pattern noise and random spatial-temporal noise in 3D noise model as data source for blind-pixel detection is proposed, and the feature vector of pixels is formed. The bivariate normality distribution model of feature vector is constructed and the blind pixels are regarded as abnormal pixels, dissociating from the normal distribution ellipsoid. The statistical distance in the feature space and the feature space angle are regarded as statistical criteria of detection of abnormal pixels, and the dead pixels, over-hot pixels and blinking pixels are classified. The algorithm is applied to the actual blind-pixel detection of cooled IRFPA, and the result proves its validity.

Key words: IRFPA; blind-pixel detection; statistical distance; feature space angle

红外焦平面阵列(IRFPA)技术的快速发展,使红外成像系统向更加广泛的应用领域扩展,但由于制造工艺等因素的影响,IRFPA器件不可避免地存在着盲元、非均匀性等问题,从而大大降低了红外成像系统的性能^[1-2].盲元是指红外焦平面(IRFPA)中响应过高和过低的探测器单元.对于盲元,国家规范主要是从器件对黑体辐射的响应程度进行定义的^[3],认为响应率小于十分之一平均响应率的像元为死像元,噪声电压大于十倍平均噪声电压的像元为过热像元.可见,盲元使得

红外辐射响应具有很强的非线性,因此在对焦平面采用线性非均匀性校正之前必须采取有效的盲元检测方法对盲元予以剔除或补偿,以提高非均匀性校正的精度,改善系统的成像性能^[4-6].

但是在实际应用中,像素的响应电压要经过A/D转换、滤波等一系列处理通过接口上传到计算机,存在灰度取整、电路噪声等各方面的影响.因此,要通过必要的数据处理获取能够真实反映像素之间响应程度差异的数据作为盲元检测的数据源,从本质上降低盲元误判的概率.

文献[7]根据盲元温度响应特性曲线多为非线性的特性,提出了基于双黑体参考辐射源进行盲元检测的方法.将像元高低温黑体响应值的差

收稿日期: 2008-08-17.

作者简介: 李秋明(1972—),男,副教授.

值作为盲元检测的数据源,与经验阈值比较确定盲元的位置.文献[8]将焦平面对黑体辐射源的时序响应平均值作为数据源,利用盲元特性进行判别.文献[9]根据均匀背景红外图像的灰度值近似正态分布的原理,直接利用焦平面的输出响应值,采用局部信噪比作为判别函数,进行盲元定位.可见,上述3种方法进行盲元检测时利用的数据源有所不同,但不外乎两种形式,一是利用均匀黑体的直接信号输出,二是其时序响应的平均值.然而,这两种形式的数据源在实际应用中不甚合理,主要是因为其在不同程度上耦合了焦平面成像过程中3个方向(行方向、列方向、时间方向)的非均匀性,不能直接反映像元之间响应的差异,利用其进行盲元检测存在误判.

基于上述考虑,本文首先分析了盲元的特性,提出了将焦平面三维噪声中的随机时空噪声以及固定图形噪声作为盲元检测的数据源.然后提出了基于特征空间分类的盲元检测方法,并对制冷型红外焦平面的盲元进行了检测.

1 盲元特性分析与检测数据源获取

从统计的角度可以认为盲元是一种异常像元,理论与实验发现,这种异常性表现在两个方面:1)像元响应率的异常;2)时序上像元响应起伏程度的异常,即像元时间噪声大小的异常.这两种异常在图像中分别表现为像元恒亮、恒暗或者时序上强烈闪烁.但是,在实际焦平面成像过程中,图像像元的强度耦合了时间、行、列方向的多重非均匀性,表征像元异常特性的参数不能直接获取,必须采用有效的方法进行解耦处理,提取能够表征这两种特性的数据源,而三维噪声模型正是这样一种有效工具^[10-11].

红外凝视焦平面阵列成像过程存在特有的三维噪声(行方向、列方向、时间方向)特性,其组成成分及可能噪声源如表1所示,角标 t 、 v 、 h 分别表示时间、行、列方向.而盲元作为响应非均匀性的一种形式,包含在 N_{vh} 之中, N_{vh} 消除了时间噪声起伏以及行、列方向非均匀性的影响,能够单一反映像素之间的响应非均匀性.另外,探测器像元时间噪声大小的异常也是判别盲元的一个标准,过大的时间噪声将淹没响应信号,使信号失真,应该判别为盲元,这种特性包含在三维噪声中的随机时空噪声 N_{tvh} 中.

N_{vh} 与 N_{tvh} 的计算公式为^[10]

$$\begin{aligned} N_{vh} &= [1 - D_v][1 - D_h]D_t U(t, v, h), \\ N_{tvh} &= [1 - D_t][1 - D_v][1 - D_h]U(t, v, h). \end{aligned}$$

式中: $U(t, v, h)$ 为连续帧数字图像形成的图像“立方体”,坐标方向如图1所示; D_A (A 表示角标 t 、 v 或 h)为 A 方向均值算子, $1 - D_A$ 为 A 方向均值去除算子.

表1 三维噪声成份描述和相应的可能噪声源

噪声	描述	噪声源
N_{tvh}	随机时空噪声	探测器时间噪声
N_{tv}	时间行噪声	$1/f$ 噪声,读出噪声
N_{th}	时间列噪声	扫描噪声
N_{vh}	固定图形噪声	探测器非均匀性
N_v	固定行噪声	$1/f$ 噪声
N_h	固定列噪声	扫描噪声
N_t	帧间噪声	帧起伏
S	所有成份均值	

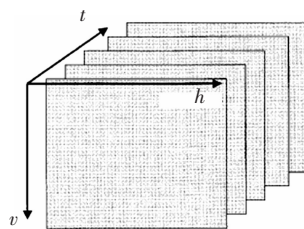


图1 三维噪声坐标系统

2 基于特征空间分类的盲元检测

根据以上分析可得,表征像元 (x, y) 的响应率与时序噪声的特征向量为

$$\mathbf{E}(x, y) = [N_{tvh}(x, y), N_{vh}(x, y)].$$

由于 N_{tvh} 与 N_{vh} 之间不相关,因此设 $\mathbf{E}$ 符合二元独立正态分布,其概率密度函数可以建模为

$$\begin{aligned} f(\mathbf{E}(x, y)) &= \frac{1}{(2\pi)^2 \sigma_{N_{tvh}} \sigma_{N_{vh}}} \\ &\exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(N_{tvh}(x, y) - N_{tvh}^0)^2}{\sigma_{N_{tvh}}^2} + \frac{(N_{vh}(x, y) - N_{vh}^0)^2}{\sigma_{N_{vh}}^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{N_{tvh}}$ 、 $\sigma_{N_{vh}}$ 分别是 $N_{tvh}(x, y)$ 与 $N_{vh}(x, y)$ 的均方差, $\boldsymbol{\mu}$ 为特征的均值向量, $\boldsymbol{\mu} = [N_{tvh}^0, N_{vh}^0]$. $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\sigma_{N_{tvh}}$ 、 $\sigma_{N_{vh}}$ 利用数据集 $\{\mathbf{E}(x, y)\}$ 进行估计得到

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{E}(x, y), \\ \sigma_{N_{tvh}}^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (N_{tvh}(x, y) - N_{tvh}^0)^2, \\ \sigma_{N_{vh}}^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (N_{vh}(x, y) - N_{vh}^0)^2. \end{aligned}$$

理论上,在特征空间中 $\mathbf{E}(x, y)$ 构成概率密度椭圆面,而盲元的特征可以看作是椭圆之外的异常孤立点,如图2所示.因此,可以通过这种统计特性的异常建立盲元的检测判别.

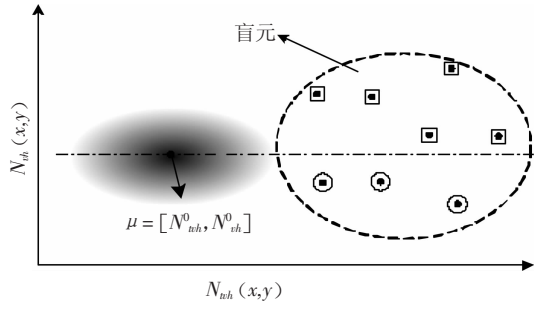


图2 特征散点图

2.1 统计距离

如图2所示, $f(\hat{\mathbf{E}}(x,y)) = C$ (C 为恒量)时, $D^2(x,y) = D_T^2$,此时由 $\hat{\mathbf{E}}(x,y)$ 构成等概率椭圆. 因此,令

$$D^2(x,y) = \frac{(N_{th}(x,y) - N_{th}^0)^2}{\sigma_{N_{th}}^2} + \frac{(N_{nh}(x,y) - N_{nh}^0)^2}{\sigma_{N_{nh}}^2}.$$

定义 $D(x,y)$ 为特征 $\mathbf{E}(x,y)$ 在特征空间的统计距离.

可以利用 $D^2(x,y)$ 与 D_T^2 的关系判断像元 (x,y) 的特征 $[N_{th}(x,y), N_{nh}(x,y)]$ 在特征空间是否为异常孤立点,即判别像元 (x,y) 是否为盲元.

可见,在上述算法中 D_T^2 的选取决定着盲元的检测精度,在实际检测过程中可以通过盲元的概率作为限制条件加以确定,即利用 $P(D^2 > D_T^2) < k$ 确定 (k 为盲元所占百分比,为焦平面固有参数). 然而在实际中由于焦平面制作工艺的限制,生产厂家提供的 k 值往往不够准确,并且随着焦平面的使用消耗盲元也存在着增多的可能,因此精确的 D_T^2 应该利用实测数据自适应确定. 本文方法采用的原理为:偏度描述了图像数据直方图的对称程度,理想二元正态分布各主分量偏度为零,而盲元的存在使得这种统计特性发生微小变化,因此可以根据对统计特征 $\mathbf{E}(x,y)$ 偏度 g_j ($j = 1, 2$) 的限制确定门限 D_T^2 . 方法的具体步骤为

1) 对焦平面所有像素的特征向量 $\mathbf{E}(x,y)$ 进行统计,获得正态分布参数,令初始 $D_T^2 = D_0^2$,变化步长为 l ,偏度阈值为 ξ ;

2) 计算 $D^2(x,y) \leq D_T^2$ 条件下两特征的偏度 g_j ,如果 $g_j \leq \xi$ 对于 $j = 1, 2$ 都成立,转入4),否则转入3);

3) 令 $D_T^2 = D_T^2 - l$,转入2);

4) 统计距离门限为 D_T^2 , $D^2(x,y) > D_T^2$ 的像素判别为盲元.

2.2 特征空间角 $\theta(x,y)$

本文对原始盲元的定义进行了扩展,综合考虑了像元的响应率以及该像元的时间噪声强度,并将像元的这两种特性利用特征空间的统计距离

进行表征,利用它能够将特性异常的盲元同时提取出来. 但是如图2所示,满足统计距离条件的盲元信号的特性可能不同,在各种不同应用的信号处理后续工作中往往需要区别对待,并采用不同的补偿方式,因此需要对其进行分类.

由于固定图形噪声与随机时空噪声的非相关性,可以利用特征空间角 $\theta(x,y)$ 对盲元进一步分类, $\theta(x,y)$ 的定义如下

$$\theta(x,y) = \arctan \frac{(N_{th}(x,y) - N_{th}^0)/\sigma_{N_{th}}}{(N_{nh}(x,y) - N_{nh}^0)/\sigma_{N_{nh}}}.$$

综合 $D^2(x,y)$ 与 $\sin \theta(x,y)$ 得到的分类判据如下:

1) $D^2(x,y) > D_T^2$ 且 $\sin \theta(x,y) > \zeta$, 过热像元;

2) $D^2(x,y) > D_T^2$ 且 $\sin \theta(x,y) < -\zeta$, 死像元;

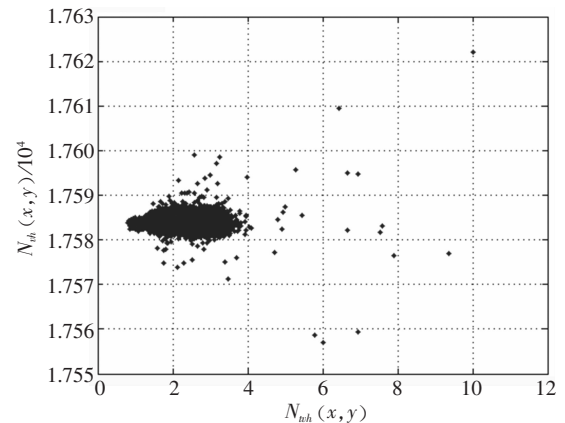
3) $D^2(x,y) > D_T^2$ 且 $|\sin \theta(x,y)| \leq \zeta$, 闪烁像元.

$|\sin \theta(x,y)|$ 表征了盲元信号在时序上的变化程度,参数 ζ 为变化程度的分类阈值.

可见,这种盲元分类判据是在融合固定图形噪声与随机时空噪声的基础上建立起来的,是原有单纯考虑像元响应率进行过热像元与死像元分类的扩展,是一种更为精细的盲元分类判别准则.

3 实测实验

上述建立的盲元检测算法以焦平面像素二维特征向量的统计异常特性为检测判据,因此为了验证该算法在特征选择上的可行性以及在实测数据上的盲元检测性能,本文进行了实测实验. 利用 320×258 制冷型红外热像仪进行了时序多帧噪声数据的采集,选择连续帧数 $n = 118$. 像元 (x,y) 特征 $\mathbf{E}(x,y)$ 的散点图如图3所示,利用像元 (x,y) 的统计距离平方 $D^2(x,y)$ 与特征空间角的正弦 $\sin \theta(x,y)$ 在二维空间形成点 $(D^2(x,y), \sin \theta(x,y))$,

图3 像素特征 $\mathbf{E}(x,y)$ 的散点图

散点图如图4所示. 设定 $D_0^2 = 70$, 变化步长为 $l = 1$, 偏度阈值为 $\xi = 0.05$, 计算得到的统计距离阈值 $D_T^2 = 47$. 设定阈值 $\zeta = 0.5$, 则经过分类得到的过热像元、死像元以及闪烁像元在图像中的定位结果如图5~7所示.

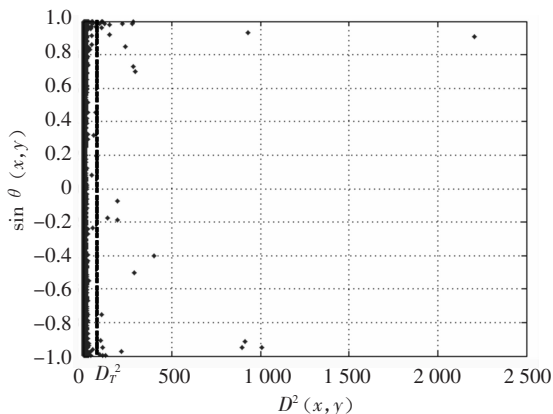


图4 $D^2(x, y)$ 与 $\sin \theta(x, y)$ 的散点图



图5 过热像元检测结果



图6 死像元检测结果



图7 闪烁像元检测结果

4 结 论

本文提出了将三维噪声模型中的固定图形噪声与随机时空噪声作为盲元检测的数据源,建立了像元特征向量的独立正态分布统计模型,将盲元看作是特征空间中统计特性异常的像素点.以统计距离与特征空间角作为异常像素检测的统计

判据,并用于分类死像元、过热像元以及闪烁像元,实验结果证明了该算法的有效性.

参考文献:

- [1] RUMMELT N I, CICCHI T, CURZAN J P. A combined non-uniformity and bad pixel correction method for superpixelated infrared imagery[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Orlando: the International Society for Optical Engineering, 2006: 62060V - 8.
- [2] RIOU O, BERREBI S, BREMOND P. Non uniformity correction and thermal drift compensation of thermal infrared camera[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Prague: the International Society for Optical Engineering, 2004: 294 - 302.
- [3] 国家质量技术监督局. Gb/T 17444 - 1998, 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [4] YAN Y, HONG J, WANG W Y. The study of non-uniformity correction algorithm for IRFPA based on neural network[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Wuhan: the International Society for Optical Engineering, 2008: 894 - 897.
- [5] COMBETTE A, BILLON-LANFREY D, CUELHE A. Non-uniformity correction results for SOFRADIR infrared 2D staring arrays[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Orlando: the International Society for Optical Engineering, 2007: 65423Q.
- [6] TORRES S N, VERA E M, REEVES R A. Adaptive scene-based non-uniformity correction method for Infrared-Focal Plane arrays[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Orlando: the International Society for Optical Engineering, 2003: 130 - 139.
- [7] 周慧鑫, 殷世民, 刘上乾, 等. 红外焦平面器件盲元检测及补偿算法[J]. 光子学报, 2004, 33(5): 598 - 600.
- [8] 赖睿, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 红外焦平面阵列盲元检测技术研究[J]. 半导体光电, 2005, 26(3): 199 - 201.
- [9] 李言俊, 崔瑞青, 赵桂芳, 等. 一种新的红外焦平面阵列盲元检测方法[J]. 激光与红外, 2007, 37(01): 51 - 53.
- [10] DAGOSTINO J A, WEBB C M. Three-Dimensional analysis framework and measurement methodology for imaging system noise[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Orlando: the International Society for Optical Engineering, 1991: 110 - 121.
- [11] RICHWINE R, SOOD A, PURI Y, et al. A full-spectrum 3D noise-based infrared imaging sensor model[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. San Diego: the International Society for Optical Engineering, 2006: 62970A - 12.

(编辑 张 宏)