

引用格式:郭晨龙,仇振安. 线列红外无热化检测系统及其图像清晰度评价方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(12): 59-63. GUO C L, QIU Z A. On a linear infrared athermalization detection system and evaluation of its image definition[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(12): 59-63.

线列红外无热化检测系统及其图像清晰度评价方法

郭晨龙^{1,2}, 仇振安³

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000; 3. 陆航驻洛阳地区军事代表室, 河南 洛阳 471000)

摘要: 分析了红外成像系统随温度变化而离焦的原理, 提出一种线列红外无热化检测系统。分析了线列红外成像的特点, 针对传统的 SMD, TenenGrad, Laplacian 等方法容易受到线列红外条纹噪声干扰的问题, 结合所采用靶板的形状, 提出了一种基于7个方向改进的 Sobel 算子的清晰度评判的方法。实验结果表明, 该方法能够有效克服线列红外成像系统条纹随机噪声对清晰度评价因子带来的干扰。和传统算法对比发现, 所提算法的响应曲线变化趋势明显、波动小, 能够更好地满足自动调焦的单调和无偏性要求。

关键词: 线列红外; 成像系统; 无热化检测装置; 清晰度评价

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.12.012

On a Linear Infrared Athermalization Detection System and Evaluation of Its Image Definition

GUO Chen-long^{1,2}, QIU Zhen-an³

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;
2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;
3. Military Representative Office of Army Aviation in Luoyang, Luoyang 471000, China)

Abstract: The principle of the phenomenon that the infrared imaging system may defocus with the change of temperature is analyzed, and a linear infrared athermalization detection system is proposed. The characteristics of linear infrared imaging are analyzed. To solve the problem that the traditional methods of SMD, TenenGrad, Laplacian are prone to be disturbed by the stripe noise of the linear infrared system and considering the shape of the target plate, a method of definition evaluation based on the improved Sobel operator in seven directions is proposed. The experimental results show that this method can effectively overcome the interference of the stripe random noise of the linear infrared imaging system on the definition evaluation factor. Comparing with that of the traditional algorithms, the response curve of the proposed algorithm has obvious variation tendency and small fluctuation. It can better meet the monotonic and unbiased requirements of autofocusing.

Key words: linear infrared; imaging system; athermalization detection device; definition evaluation

0 引言

由于红外系统能够在夜间和恶劣天气下获得较为有效的图像信息^[1]且隐蔽性较高, 越来越多的军用侦察和告警类产品都采用了红外成像技术。作为现代化机载光电探测与对抗的核心设备, 机载红外搜索跟踪系统就是采用了红外成像的原理^[2]。红外探测器有焦

平面阵列探测器和线列探测器两大类型, 其中, 线列探测器能够较好地实现大视场, 且性能高、成本低, 很容易结合光机扫描机构实现视场的扩展^[3], 因而广泛应用于机载红外搜索系统。

由于红外光学材料的折射率温度系数 dn/dT 较大, 随着环境温度变化, 红外光学系统材料的折射率也会产生变化, 光学系统元器件的曲率、厚度和间隔也会随之改变, 再加上光机结构的热胀冷缩效应, 系统会产生离焦和其他像差, 严重影响红外系统的成像质量^[4]。考虑到机载红外搜索跟踪系统往往工作在一个较大的温度变化区间内, 成像质量受到温度波动影响较大, 故

收稿日期: 2018-01-23 修回日期: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(60974005)

作者简介: 郭晨龙(1988—), 男, 河南洛阳人, 硕士, 工程师, 研究方向为光电系统测试。

而需要对红外产品进行无热化设计^[5-6]。

为了能够在实验室环境下检测一个机载红外系统无热化设计性能的好坏,需要研制一套无热化检测系统^[7]对其进行性能评估。这个系统中图像的清晰度评价算法是其核心,国内外学者构造了多种清晰度评价算法^[8-18],常用的图像清晰度评价算法可以归纳为空域法、熵函数法、频域分析法3大类^[8]。

关于空域法的研究主要是基于灰度梯度函数的方法,包括:绝对方差函数、Roberts 梯度向量平方和、Brenner 函数、Laplacian 函数、TenenGrad 函数等^[9-10]。

熵函数的方法是根据香农信息论提出的,其主要思想是图像的信息量越大熵越大,而图像信息量越大可以认为图像清晰度越高,因此该原理被应用于图像清晰度评价中,包括信息熵等^[11-12]。

频域分析法的主要思想是聚焦图像比离焦图像具有更多的高频信息,该方法包括傅里叶变换分析法^[13]、DCT 变换法、小波分析法^[14-18]等。

由于红外图像灰度均匀性相对较差,且无热化检测过程采用的靶板灰度等级分布比较单一,所以熵函数法不太适合此类问题。而考虑到线列红外系统常带有随机条纹噪声^[19-20],仅考虑两个方向灰度变化量的 SMD, TenenGrad, Laplacian 也常常容易受到干扰,一方面它会导致调焦稳定性下降,另一方面图像平坦区域参与梯度计算也会使调焦曲线灵敏度下降,导致评价算法不够准确,影响系统调焦精度。线列红外系统条纹噪声的干扰同样对频域分析法产生较大的影响。针对此问题,本文在综合分析了系统所采用的靶板的特征及其线列红外成像特点的基础上,提出了一种主方向改进的清晰度评价算法。

1 无热化检测系统

无热化检测系统由黑体、靶标、红外平行光管、温度控制箱、视频采集电路和检测仪组成,如图1所示。

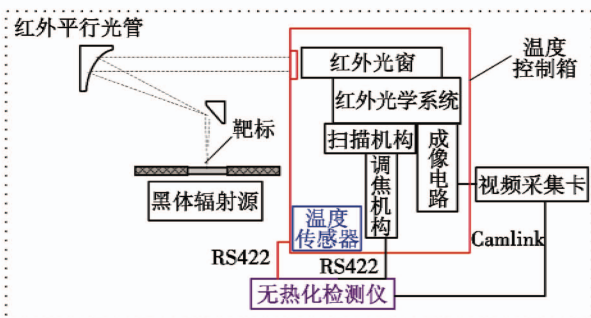


图1 无热化检测装置原理

Fig.1 The principle of athermalization detection device

红外搜索跟踪系统作为本文的被测产品,放置在温度控制箱内,它由光学系统、扫描机构、调焦控制机

构、成像电路以及伺服稳定机构组成(稳定机构不在本文讨论的范围内,图上并没有标出),其中,扫描机构以一个固定的扫描幅度值和扫描速度值进行周期性扫描,探测器在一个扫描周期内依次成像,成像电路将一个周期内的线列成像信息拼接成一整幅图像视频,调焦机构能够控制光学系统调焦补偿镜的焦距,从而使系统在不同温度下取得清晰的成像效果。

无热化检测系统具体工作流程如图2所示。黑体、靶标、红外平行光管组成了一套能够模拟无穷远处红外目标的红外模拟系统。待测产品放置在高温箱内,高温箱模拟机载环境温度的变化(-40~60℃)。在实验过程中,给扫描机构设定一个固定的扫描幅值,使之刚好能够对靶板目标区域完成一整幅图像。设置高温箱的温度值,在设定的温度下保温0.5h,使得高温箱内温度趋于稳定。控制调焦机构,对光学系统的离焦量以一个固定的步长进行全程遍历,通过无热化检测仪中的图像清晰度自动检测软件分别检测出系统在不同温度下的真实离焦量。采集整个温度区间下的离焦量以后,采用三次多项式函数进行拟合,通过与光学设计值进行比对,得出被测红外系统无热化设计的优劣。

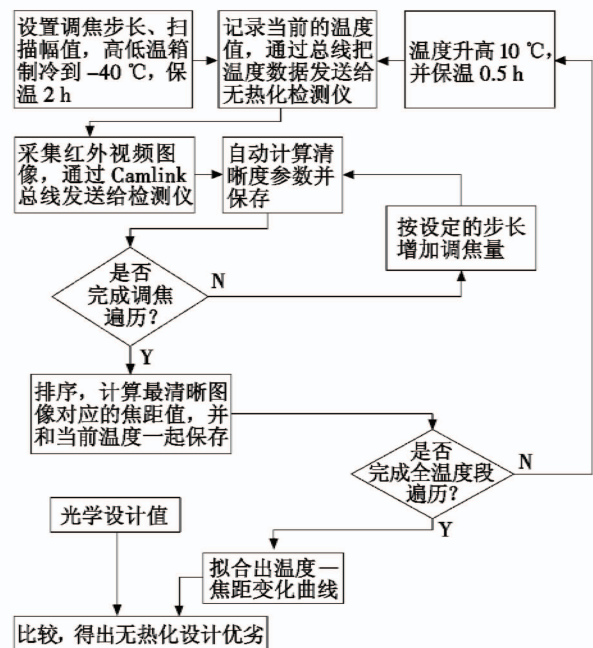


图2 无热化检测系统工作流程

Fig.2 The work flow of athermalization detection system

2 无热化检测系统的清晰度评价算法

无热化检测系统的功能可以简单描述为在每个温度点下进行自动调焦,找到最清晰的成像位置,记录下对应的补偿焦距值,与光学无热化设置值进行对比,从而判断出产品无热化设计性能的好坏。

在这个过程中,关键的步骤就是系统的自动调焦,而自动调焦的核心部分就是图像清晰度评价算法。

2.1 普通评价算子

常用灰度梯度统计框架的方法有 TenenGrad 函数、Brenner 函数、SMD 法、Laplacian 函数法等。

TenenGrad 函数法(Sobel 算子法)的算式为

$$f_{\text{TenenGrad}} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \sqrt{G_x^2(x,y) + G_y^2(x,y)} \quad (1)$$

式中, G_x 和 G_y 分别为水平和垂直方向的 Sobel 算子。

Brenner 法的算式为

$$f_{\text{Brenner}} = \sum_M \sum_N (f(x+2,y) - f(x,y))^2 \quad (2)$$

s. t. $(f(x+2,y) - f(x,y))^2 > T_{\text{Threshold}}$ 。

SMD 法的评价函数(采用水平和垂直两个方向的灰度方差)为

$$f_{\text{SMD}} = \sum_{x=2}^M \sum_{y=2}^N (|f(x,y) - f(x,y-1)| + |f(x,y) - f(x-1,y)|) \quad (3)$$

Laplacian 评价函数采用 Laplacian 处理后的图像的绝对值之和,Laplacian 梯度函数为

$$f_{\text{Laplacian}} = \sum_{x=i}^M \sum_{y=1}^N (|G_{\text{lap}}(x,y)|) \quad (4)$$

式中, $G_{\text{lap}}(x,y) = f(x,y+1) + f(x,y-1) + f(x,y+1) - 4f(x,y)$ 。

2.2 改进算子

本文实验所用的靶板为红外四杆靶,靶板的红外扫描成像单帧图像如图 3 所示。

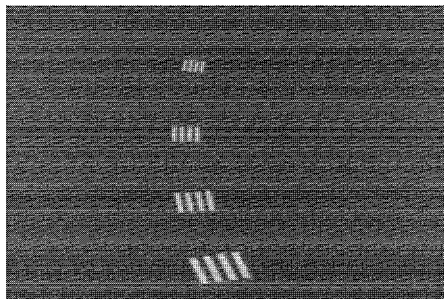


图 3 红外靶板成像视图

Fig. 3 Imaging view of infrared target plate

由于受到探测器工艺水平的限制,红外系统在温度变化时往往出现较差的非均匀性,在扫描的过程中成像的不均匀造成图像沿扫描方向出现明显的黑、白相间的条纹式噪声干扰^[10]。常用的 SMD 法、TenenGrad 法、Laplacian 函数法等进行清晰度计算时都同时考虑到了水平和垂直方向的灰度值变化量,因而很容易受到条纹噪声的影响,计算结果波动量较大,精度较差。针对这个问题,并考虑到靶板的构型,提出如图 4 所示的 7 个方向的算子进行计算。

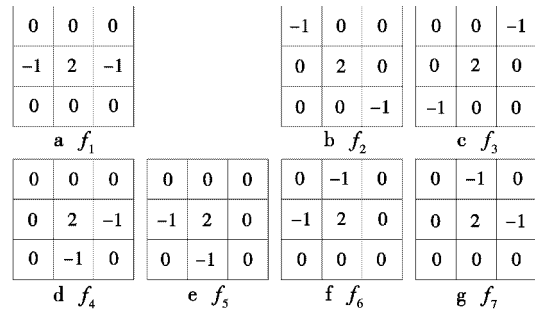


图 4 7 个方向的算子

Fig. 4 Operators of seven directions

图 4 中,7 个方向算子的表达式分别为

$$\begin{cases} f_1(i,j) = -f(i,j-1) + 2 \times f(i,j) - f(i,j+1) \\ f_2(i,j) = -f(i-1,j-1) + 2 \times f(i,j) - f(i+1,j+1) \\ f_3(i,j) = -f(i-1,j+1) + 2 \times f(i,j) - f(i+1,j-1) \\ f_4(i,j) = -f(i,j+1) + 2 \times f(i,j) - f(i+1,j) \\ f_5(i,j) = -f(i,j-1) + 2 \times f(i,j) - f(i+1,j) \\ f_6(i,j) = -f(i-1,j) + 2 \times f(i,j) - f(i,j-1) \\ f_7(i,j) = -f(i-1,j) + 2 \times f(i,j) - f(i,j+1) \end{cases} \quad (5)$$

通过算式发现,该算子考虑到了 7 个方向的灰度变化趋势,用上述 7 个算子分别对原图像求卷积,选择每个像素计算结果的绝对值的最大值作为结果,并选择该结果对应的方向算子为主方向。为了避免主方向受到非均匀性以及随机噪声的干扰,采用如下阈值化的计算方法,主方向计算值和次方向计算值之差的绝对值满足一定的阈值 $T_{\text{threshold}}$ 才能作为有效结果,如

$$g(x,y) = \begin{cases} \max\{|f_{i \in (0,1,\dots,7)}(x,y)|\} & \text{限制 1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中,限制 1 为条件限制,满足

$$|\max\{|f_{i \in (0,1,\dots,7)}(x,y)|\} - \text{secondmax}\{|f_{i \in (0,1,\dots,7)}(x,y)|\}| > T_{\text{threshold}} \quad (7)$$

式中, $T_{\text{threshold}}$ 为条件阈值,其计算方法为:对除极大值之外的剩余 6 个 $f_i(x,y)$ 的绝对值 $|f_i(x,y)|$ 做降序排列,获得一个新的 7 维向量 $\mathbf{S} \in \mathbf{R}^7$,于是构建阈值为

$$T_{\text{threshold}} = 2 \times (\sum_{i=1}^6 (\mathbf{S}_i - \mathbf{S}_{i+1})) / 6 \quad (8)$$

最终评价函数可以表述为

$$f_{\text{gsed}} = \sum_{x=2}^M \sum_{y=2}^N g(x,y) \quad (9)$$

3 实验分析

3.1 几种算子处理后的图像对比(实验一)

采用本文方法和其他几种灰度梯度算法进行对比,以图 3 红外靶板图为例,分别对比采用 Sobel 算子(取平均后对应)、灰度方差(SMD)算子、Laplacian 算子以及本文算子对四杆靶图像进行处理,处理后的结

果对比如图5所示。

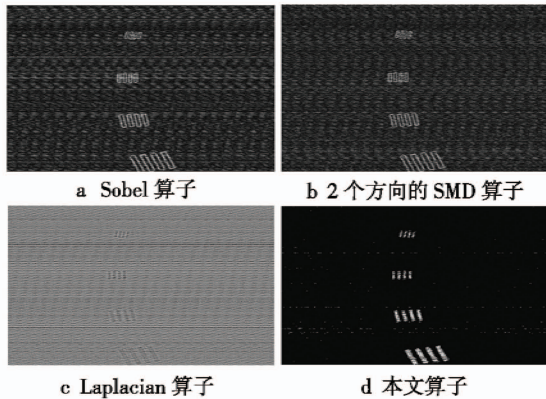


图5 4种算子处理后的图像对比

Fig. 5 Images after processing by using the 4 operators

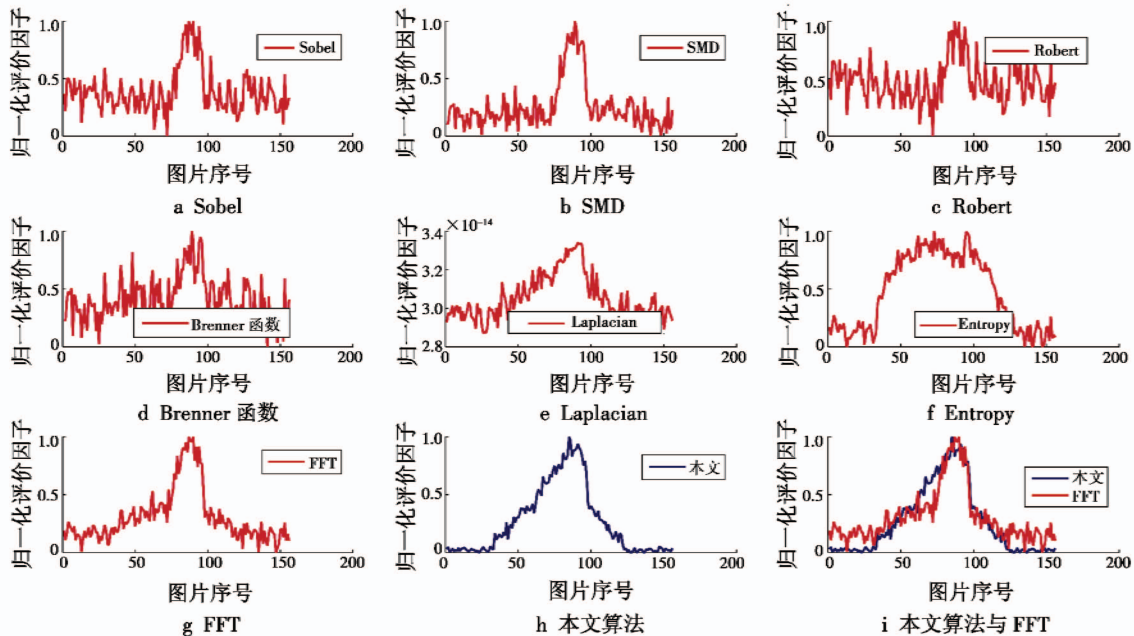


图6 8种算法的聚焦曲线对比

Fig. 6 Focusing curves of the 8 algorithms

从图6中可以明确地看出,传统算法平缓区域受到噪声的干扰影响较大且波动较大,而本文算法抗噪声能力较强。还可以看出,本文算法聚焦曲线最凸,平缓区波动最小。同时本文算法具有无偏性,它成功地判断第85幅图像为最清晰的位置,FFT函数算法虽然取得和本文接近的凸性的曲线,但其不具备无偏性,错误地判别第90幅为最佳清晰点。

为了量化几种算法曲线的性能,采用文献[21]中的算法对清晰度评价算法进行定量分析,分别计算了清晰度比率、陡峭度、平缓区波动量、局部极值因子、灵敏度5个指标,其中,清晰度比率、陡峭度以及灵敏度3个参数数值越大反映该方面性能越好,平缓区波动量、局部极值因子数值越小反映曲线性能越稳定,几种评价曲线的5种指标的计算结果如表1所示。

从图5中可以看出,Sobel算子、Laplacian算子和SMD算子都对条纹噪声十分敏感,而本文算子在设置好合适的阈值以后能够有效地抑制条纹噪声的干扰。

3.2 评价函数性能分析(实验二)

在恒定温度为0℃时进行,从头至尾以一个恒定的步长进行调焦遍历,采集156幅不同焦距下的成像图像,根据肉眼观测,第85幅为最清晰的图像,将本文算法与传统灰度梯度框架的TenenGrad(Sobel算子)、SMD、Robert算子法、Brenner、Laplacian算子法,还有文献[13]中列出的频域的FFT分析法以及熵函数框架的信息熵(Entropy)等方法进行对比,计算结果都采用归一化处理,几种算法的评价函数曲线对比如图6所示。

表1 几种曲线的5个评价指标值

Table 1 5 evaluation index values of several curves

	清晰度比率	陡峭度	平缓区波动量	局部极值因子	灵敏度
本文算法	1.4085	1.7514	0.0015	0.0577	8.7184
Sobel算子	1.3866	1.4287	0.0073	0.175	5.6652
SMD算子	1.4798	1.0608	0.0117	0.2191	1.8619
Robert算子	1.4759	0.7759	0.0224	0.2969	1.6268
Brenner函数	1.4002	1.0635	0.023	0.3003	4.2631
Laplacian算子	1.1975	0.8164	0.043	0.1975	8.5266
Entropy法	1.1799	1.6445	0.0031	0.047	1.4726
FFT法	1.1988	1.4575	0.0085	0.0819	2.1925

从表1中可以看出,本文算法陡峭度、平缓区波动量和灵敏度相对其他几种算法取得了最佳的性能,而在局部极值因子上,其性能排名第二,整体来说本文算法性能最佳。

4 结论

本文分析了红外温度变化造成离焦的原理,提出了一种线列红外的无热化检测系统。考虑到线列红外容易产生的条纹状干扰,结合本文所采用的靶板的构型,提出了一种7个方向的清晰度评价算子,将其应用于自动调焦过程的清晰度评价。

实验结果表明,相对其他几种对比算法而言,采用本文算法所获得的清晰度变化曲线波动小、平滑,变化趋势快,能够有效地克服条纹噪声带来的干扰,更精确地计算出清晰点。5种量化的性能指标同样证明了本文算法的优越性。

参考文献

- [1] 王高峰. 线列红外探测器成像与评价系统设计[D]. 天津:天津大学,2012.
- [2] 何杰. 机载红外搜索跟踪系统研究与仿真实现[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [3] 乔明霞,曾威. 长波红外双视场扫描型光学系统[J]. 电光与控制,2013,20(3):77-80.
- [4] 徐大维,向阳,王健,等. 折衍混合车载红外镜头无热化设计[J]. 红外技术,2011,33(8):460-464.
- [5] 刘欣,刘春华,潘枝峰,等. 机载复杂红外光学系统无热化补偿方法研究[J]. 电光与控制,2012,19(7):68-70.
- [6] 沈宏海,王国华,丁金伟,等. 主动补偿无热化技术在机载红外光学系统中的应用[J]. 光学精密工程,2010,18(3):593-601.
- [7] 左保军,梁炎锋. 基于图像处理的光学无热化设计效果检测系统[J]. 红外与激光工程,2012,41(6):1600-1604.
- [8] 洪裕珍,任国强,孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. 光学精密工程,2014,22(12):3401-3408.
- [9] 赵辉,鲍歌堂,陶卫. 图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J]. 光学精密工程,2004,12(5):531-536.
- [10] 张来线,孙华燕,郭惠超,等. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法[J]. 光子学报,2013,42(5):605-610.
- [11] JARVIS R A. Focus optimization criteria for computer image processing [J]. Microscope, 1976, 24 (2) : 163-180.
- [12] HORN B K P. Focusing; technical report AIM-160[R]. Cambridge;Massachusetts Institute of Technology, 1968.
- [13] 李祚林,李晓辉,马灵玲,等. 面向无参考图像的清晰度评价方法研究[J]. 遥感技术与应用,2011,26(2):239-246.
- [14] KAUTSKY J, FLUSSER J, ZITOVA B, et al. A new wavelet-based measure of image focus [J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(14):1785-1794.
- [15] TIAN J, CHEN L. Adaptive multi-focus image fusion using a wavelet-based statistical sharpness measure [J]. Signal Processing, 2012, 92(9):2137-2146.
- [16] LIU Y P, JIN J, WANG Q, et al. Phases measure of image sharpness based on quaternion wavelet [J]. Pattern Recognition Letters, 2013, 34(9):1063-1070.
- [17] 刘兴宝,袁道成. 基于纹理分析的小波变换图像清晰度评价方法研究[J]. 仪器仪表学报,2007,28(8):1508-1513.
- [18] 菅维乐,姜威,周贤. 一种基于小波变换的数字图像自动聚焦算法[J]. 山东大学学报:工学版,2004,34(6):38-40.
- [19] 郑为. 基于线列红外探测器的图像增强算法研究[J]. 激光与红外,2015,45(1):84-87.
- [20] 郭杰锋,陈桂林. 线列探测器非均匀性对点目标检测的影响[J]. 红外技术,2009,31(2):103-106.
- [21] 翟永平,周东翔,刘云辉,等. 聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取[J]. 光学学报,2011,31(4):234-244.