

测试装置空间分布对红外相机噪声等效温差测试的影响

刘天娇^{1,2}, 张涛^{1,2*}, 李俊霖¹, 唐延甫¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所质检中心, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 红外相机的噪声等效温差(NETD)是评价成像质量的一项重要准则。红外相机 NETD 测试装置中的黑体辐射源、靶标、入瞳(平行光管加待测相机)三者的位置、口径需要满足一定的数学关系,否则会降低测试精度。基于几何光学理论、辐射度学,推导出红外相机测试系统中黑体辐射源、靶标、入瞳三者的空间分布关系,研究靶标孔处的测量温度与后方黑体辐射源温度之间的关系,建立数学模型,指导红外相机测试系统的试验,并结合一套测试系统,验证了测试装置空间分布满足本模型要求时,相对误差小于 7.4%,否则测试精度迅速下降。分析了以靶标为目标时,靶标孔处的温度均匀性和稳定度的变化。

关键词 红外成像; 空间分布; 辐射测温; 靶标孔

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213060

Effect of Spatial Distribution of Test Device on Noise Equivalent Temperature Difference Test of Infrared Camera

Liu Tianjiao^{1,2}, Zhang Tao^{1,2*}, Li Junlin¹, Tang Yanfu¹

¹Quality Inspection Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The noise equivalent temperature difference (NETD) of infrared cameras is a crucial criterion for evaluating the imaging quality. The position and aperture of the blackbody source, target, and entrance pupil (the collimator and the camera to be measured as a whole) in an infrared camera NETD test device should meet the specific mathematical relationship, otherwise the test accuracy will be reduced. Therefore, based on geometrical optics theory and radiology, the spatial distribution of the blackbody source, target, and entrance pupil in the infrared camera testing system is deduced in this study. Additionally, the relationship between the measured temperature at the target hole and the blackbody source temperature at the rear is explored. A mathematical model has been established to guide the test of the infrared camera test system. Combined with a test system, the relative error is verified to be less than 7.4% when the spatial distribution of the test device meets the proposed model requirement; otherwise the test accuracy decreases rapidly. The temperature uniformity and stability at the target hole are analyzed when the target is used.

Key words infrared imaging; spatial distribution; radiation thermometry; target hole

1 引言

红外相机的应用起源于军事领域,到 20 世纪 80 年代初逐渐引入民用工业领域。由于具有检测速度快、精度高、非接触^[1]、范围广、实时观测等诸多优点,红外相机现已广泛用于医用测温^[2]、建筑节能评价、生产过

程监控、材料缺陷的检测与评价、设备状态的热诊断、夜视^[3]、减灾防灾等许多方面^[4-5],近几年大动态范围红外相机的应用逐渐增多。噪声等效温差(NETD)是红外热像仪的综合评价参数,对 NETD 进行测试,可以了解噪声、线性度、灵敏度等多项特性,由此可见,红外相机性能参数测试系统的研究对红外相机测温技术的

收稿日期: 2021-11-25; 修回日期: 2021-12-17; 录用日期: 2022-01-13; 网络首发日期: 2022-01-23

通讯作者: *ZhangT@ciomp.an.cn

发展和有效应用意义重大。已经有很多学者对基于算法补偿技术的高精度测试方法进行了研究^[6-8],但是对测试装置空间分布模型的研究较少,因此为了保证 NETD 测试的准确性,需要建立测试装置空间分布模型。

本文重点研究了测试装置空间分布关系对

NETD 测试的影响,开展实验,分析其对红外相机入瞳接收的辐射能量、温度均匀性、温度稳定度的影响。

2 红外相机 NETD 测试原理

红外相机测试装置包括黑体辐射源、控制器、靶标、平行光管^[9]等,如图 1 所示。

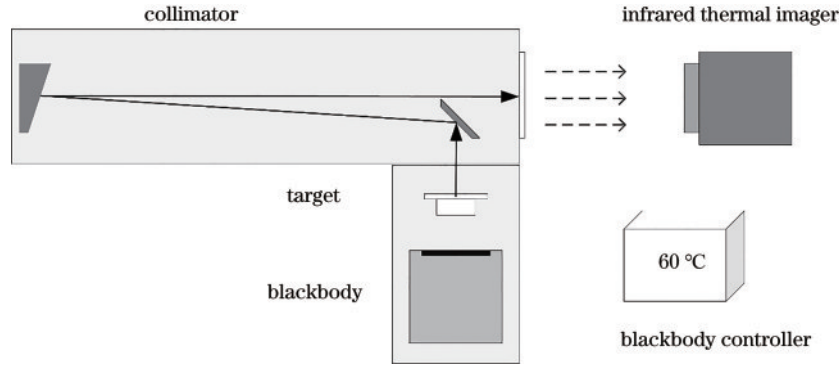


图 1 红外热像仪测试系统

Fig. 1 Infrared thermal imager test system

目标发射的充满入瞳的红外辐射被红外光学系统会聚到焦平面上^[10],形成热图像,得到目标温度分布。红外相机是基于普朗克定律进行温度测量的^[11]。如果黑体为朗伯辐射体,则满足朗伯辐射定律:理想的漫射体或反射体在任意方向上的辐射强度 I_θ 与观测方向相对于辐射表面法线夹角 θ 的余弦成正比。朗伯辐射定律的公式为

$$I_\theta = I_0 \cos \theta, \quad (1)$$

式中: I_0 为辐射表面法线方向的辐射强度。所以对于朗伯辐射源,辐射亮度与立体角无关,由球坐标的立体角元 $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$, 有

$$M = L \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \sin \theta d\theta = \pi L, \quad (2)$$

式中: M 为辐射出度; L 为辐射亮度; φ 为入瞳面上的平面角。光学系统的光透射率对于同一个镜头而言可以近似为处处相等^[12]。单个像元输出电压为

$$V_s = \frac{\pi A_d}{4 F^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \tau(\lambda) \frac{c_1}{\pi \lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} d\lambda, \quad (3)$$

式中: $R(\lambda)$ 是响应率; A_d 是探测器单个像元面积; F 是光学系统 F 数; $\tau(\lambda)$ 是光学系统的衰减函数^[13]; c_1 是第一辐射常量; c_2 是第二辐射常量。

NETD 定义为信噪比为 1 时的温差^[14],用于描述红外成像系统受客观信噪比限制的温度分辨率^[15]。NETD 的表达式为

$$N_{\text{ETD}} = \frac{4F^2 \Delta f^{\frac{1}{2}}}{A_d^{\frac{1}{2}}} \left[\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} D^*(\lambda) \tau(\lambda) \frac{\partial M(\lambda, T_B)}{\partial T} \right]^{-1}, \quad (4)$$

式中: N_{ETD} 是噪声等效温差; T_B 是背景温度; Δf 是噪声等效带宽; $D^*(\lambda)$ 是归一化的探测率。测试 NETD 的

方法是:在不同的黑体温度下^[16]测量响应电压,用最小二乘法拟合出线性区和饱和区的直线,可得出信号传递函数(注意温差为光学系统入瞳处温差),基于三维噪声模型,对每个测试点的图像进行处理,在选中区域内的背景部分(也可取信号部分)进行数据收集测量^[17],得到三维噪声均方根^[18]。

$$N_{\text{ETD}} = \frac{\sigma_N}{S_{\text{ITF}}}, \quad (5)$$

式中: σ_N 是噪声均方根; S_{ITF} 是信号传递函数。当目标辐射到红外相机入瞳的能量与实际设置值不一致时,会影响信号传递函数 S_{ITF} 的测试,目标温度均匀性和控温稳定度会影响噪声均方根 σ_N 的测试。由式(5)可见,这两个参数不准确会导致 NETD 测试结果准确度下降,因此在测试时,要保证目标辐射到入瞳的能量与设定值一致,目标温度均匀性和控温稳定度良好。

3 测试装置空间分布模型

在搭建硬件平台之前,应该先建立黑体辐射源、靶标、入瞳三者的空间分布模型。图 2 中,靶标是镂空

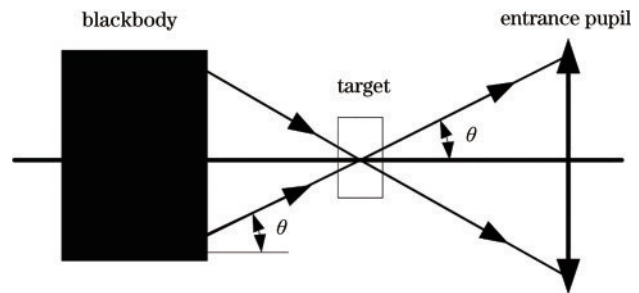


图 2 靶标孔上一点充满入瞳的光线的来源

Fig. 2 Source of light filling the entrance pupil at a point on the target hole

的,当红外相机对靶标面成像时,所测温度为靶标孔处的等效温度,而靶标孔处的辐射来源于后方黑体辐射源,所以在黑体辐射源绝对均匀和稳定、大气衰减作用很弱、大气透过率可近似为 1 的情况下,靶标孔处的辐射为后方黑体辐射,靶标孔上一点发出的充满光学系统入瞳的辐射来源于后方黑体辐射源(朗伯体),此点发出的充满入瞳的总辐射量为图 2 对应后方黑体辐射源面积上每一点入射到此点的辐射的积分。所以靶标镂空部分等效为与后方黑体辐射源同温度的黑体辐射源,该点对应的 2θ 视场要被黑体辐射源充满,否则不再等效,并且会受环境辐射的影响。

由图 3 几何关系可知,经过靶标上的一点充满入瞳的光线来源于后方黑体辐射源上的一个圆形区域(假设入瞳为圆形),改变黑体辐射源的位置使得黑体辐射源与靶标的距离发生变化,经过靶标上的同一点充满入瞳的光线来源于后方黑体辐射源上的一个与变化之前同心的圆形区域,即不同距离对应的黑体辐射源区域为一组同心圆,且同一距离处,靶标上不同点对应的黑体辐射源面积相等。

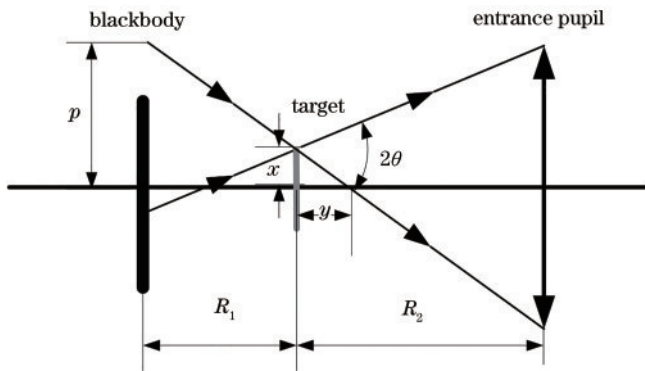


图 3 黑体辐射源、靶标、入瞳的几何关系

Fig. 3 Geometric relation of blackbody source, target, and entrance pupil

设黑体辐射源直径为 D_B ,入瞳半径为 r ,靶标镂空部分长度为 $2x$,黑体辐射源与靶标的距离为 R_1 ,靶标与入瞳的距离为 R_2 ,经靶标镂空处的点充满入瞳的光线对应的后方黑体辐射源圆形区域的最高点与轴线的距离为 d ,经靶标镂空处的点入射到入瞳下边缘的光线与轴线的交点到靶标的距离为 y ,那么根据图 3 中的三角形相似关系,有

$$\frac{r}{d} = \frac{R_2 - y}{R_1 + y}, \quad (6)$$

$$\frac{x}{d} = \frac{y}{R_1 + y}, \quad (7)$$

$$\frac{(R_1 + R_2)x + R_1 r}{R_2} < \frac{D_B}{2}. \quad (8)$$

当靶标、黑体辐射源、入瞳三者的空间分布满足上述关系时,靶标镂空部分等效于后方黑体辐射源。黑体辐射源、靶标、入瞳三者的空间分布在几何关系范围

内时,对入瞳处的辐射能基本无影响,与实际设置值相等,对 NETD 测试结果没有影响;超出几何关系范围后,靶标孔等效温度不再等于黑体辐射源温度,且靶标面均匀性和稳定度受背景环境影响,影响 NETD 测试。

本文的数学模型是在黑体辐射源完全均匀、稳定且为朗伯辐射源的前提下建立的,然而实际黑体辐射源并非绝对均匀稳定,且根据实验,黑体辐射源不同区域的均匀性不同,越远离中心的区域,均匀性越差;黑体辐射源上不同点的稳定度不同,越远离中心的点,稳定度越差。所以这会直接导致靶标孔处不同点的辐射不均匀。因此黑体辐射源的均匀性、稳定度会影响靶标面上的均匀性、稳定度,不均匀、不稳定的辐射经平行光管被红外相机接收后,最终会影响 NETD 的测试结果,且靶标孔的均匀性、稳定度与黑体辐射源本身不等效(均匀性、稳定度传递)。

4 实验方法与结果

4.1 实验方法

测试装置采用工作波段为 $7.5 \sim 14 \mu\text{m}$ 的红外热像仪(VarioCAM[®]hr head, InfraTec, 德国)、以色列 CI 黑体(直径为 3 cm)、焦距为 400 mm 的平行光管、全透光圆靶。

靶标与入瞳的距离设置为 72 cm,入瞳直径为 2.5 cm,调焦使靶标清晰成像,设置黑体辐射源温度为 80°C 。在靶标半径分别为 0.35, 0.49, 0.63 cm 时,前后移动黑体辐射源,使其与靶标的距离为 20~80 cm,观察测温结果,观察临界点与所建立的数学模型结论是否一致。在所选取的 4 个不同尺寸的靶标边缘画圆环,测量圆环的平均温度,这样可以消除靶标、黑体辐射源、相机三者不同轴造成的影响(不同轴但轴线平行)。根据上述分析对得到的热图像进行处理,从每张热图像中选取相同环形区域,如图 4 所示,计算此区域 100 帧图像的平均值作为最终测量结果。

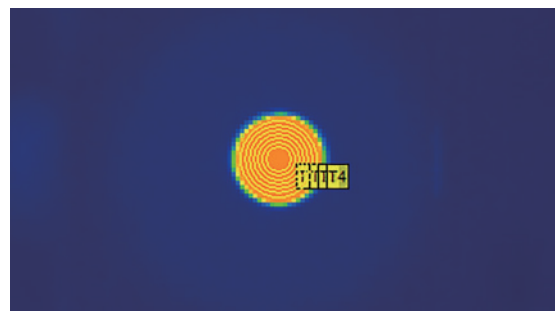


图 4 选取的不同尺寸靶标边缘同心圆环图

Fig. 4 Edge concentric rings selected from targets with different sizes

4.2 实验结果

4.2.1 空间分布模型实验结果

根据实验条件,三种靶标尺寸对应的临界距离分

别为 33 cm、42 cm、52 cm。实验结果如图 5 所示,为了便于观察,对曲线进行了上下平移处理。实验所用黑体面温度分布:在以黑体辐射源中心为圆心,环外径与内径差相等的情况下,均匀分布在黑体辐射源面上的圆环的温度标准差相差不多,此黑体辐射源从中心向外加热,经过靶标上内外径差相等的同心圆环入射到入瞳的光线来源于以后方黑体辐射源中心为圆心的内外径差相等的同心圆环,这样 4 个圆环温度与距离曲线在到达各自的临界之前,是大致平行的,平行性明显变差的点即为临界距离点。

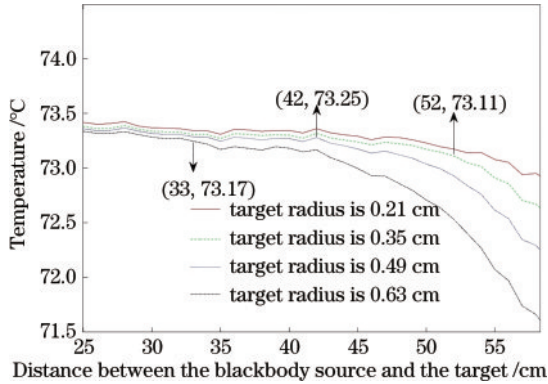


图 5 不同靶标与黑体辐射源的距离下,不同靶标圆环温度的测量结果

Fig. 5 Measurement results of ring temperature of different targets under different distances between targets and blackbody source

由实验结果可知:三种靶标尺寸对应的临界距离分别为 33 cm、42 cm、52 cm;在临界点之前,温度值整体有轻微下降趋势,有微小波动,这是因为随着距离的增大,靶标上的点发出的光线进入入瞳后对应的黑体辐射源面逐渐向黑体边缘移动,而实验所用黑体辐射源的中心温度高于边缘温度,所以临界点之前的曲线有轻微下降趋势,而黑体辐射源表面也并非绝对稳定、均匀,会有轻微波动;在临界点之后,曲线迅速下降,下降速度和趋势与背景有关。因此可证明,所建立的数学模型是合理的,与实验结果一致。

黑体辐射源直径为 3 cm,参与计算的靶标孔半径为 0.63 cm,入瞳直径为 2.5 cm,入瞳到靶标的距离为 72 cm,设置温度为 32 °C(高于室温 5 °C),则计算得到的黑体辐射源与靶标的距离最大为 33 cm,观察实验结果,超过此范围后,温度变化明显。NETD 测试相对误差如表 1 所示。

表 1 相对误差绝对值随距离的变化

Table 1 Absolute value of the relative error varying with distance

Distance / cm	20	25	30	35	40	45	50
Relative error / %	7.1	7.3	7.4	7.4	8.3	9.2	12.8

由此可见,在所计算的几何范围内,相对误差的绝对值变化不大,小于 7.4%,超出范围时,误差越来越

大,在距离为 50 cm 处相对误差的绝对值达 12.8%。

4.2.2 靶标面均匀性和稳定度实验结果

将黑体辐射源温度设置为 60 °C,黑体辐射源与平行光管的距离设置为 40 cm,不加靶标,对焦到黑体面上,测量此处均匀性和稳定度;将靶标与平行光管的距离设置为 40 cm,对焦到靶标面上,测量靶标面的均匀性和稳定度。图 6 和图 7 为热像仪测量的目标均匀性^[19],靶标上的选区面积和黑体辐射源上的完全相同,从图 6 和图 7 中温度范围(Span)和标准差(SDev)两项数据可以看出,加入靶标之后,靶标面上的均匀性变差。

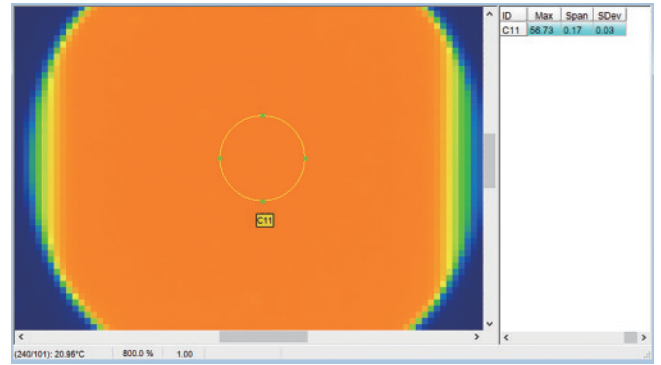


图 6 黑体辐射源面上的温度均匀性

Fig. 6 Temperature uniformity on blackbody source surface

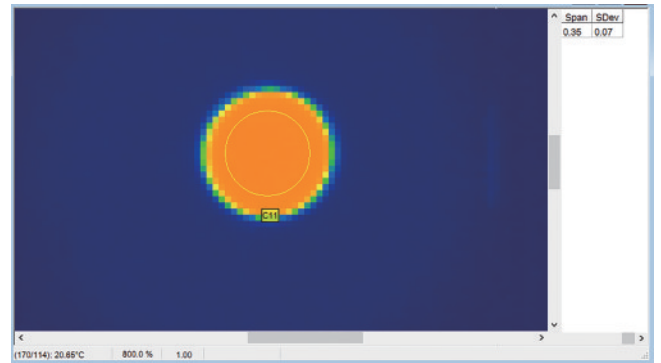


图 7 靶标面上的温度均匀性

Fig. 7 Temperature uniformity on target surface

相同条件下测量黑体辐射源的稳定度,即每隔 1 min 测量一次中心点温度值,得出黑体辐射源作为目标时温度稳定度为 0.24 °C;靶标作为目标时温度稳定度为 0.39 °C,稳定度发生了变化。黑体辐射源与靶标的距离越远,相同面积的靶标孔对应的黑体辐射源面积越大,则对黑体辐射源均匀性、稳定度的要求越高,黑体辐射源制作难度越高。所以虽然在计算的几何范围内温度基本没有变化,但是为了降低黑体辐射源制作成本,减小黑体辐射源研制难度,黑体辐射源与靶标距离不宜太远。

5 结 论

红外相机 NETD 测试装置的空间分布在建立的模型计算范围内时,相对误差可控制在 7.4% 以内,对

NETD 测试结果影响较小,超出此范围后,NETD 测试相对误差迅速变大。靶标作为目标与黑体辐射源直接作为目标相比,均匀性和稳定度发生了变化,因此搭建 NETD 硬件平台时,应在所建数学模型计算所得几何范围之内,综合考虑均匀性、稳定度的变化,合理设计各子装置的位置和口径。

参 考 文 献

- [1] 张志强,王萍,于旭东,等.高精度红外热成像测温技术研究[J].仪器仪表学报,2020,41(5):10-18.
Zhang Z Q, Wang P, Yu X D, et al. Study on high accuracy temperature measurement technology of infrared thermal imager[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 10-18.
- [2] 赵明珠,张艳,朱应燕.基于红外热成像的早期疾病检测技术的研究进展[J].激光与光电子学进展,2021,58(8):0800002.
Zhao M Z, Zhang Y, Zhu Y Y. Research progress of early disease detection technology based on infrared thermography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800002.
- [3] Camacho-Morales R, Rocco D, Xu L, et al. Infrared upconversion imaging in nonlinear metasurfaces[J]. Advanced Photonics, 2021, 3(3): 036002.
- [4] Xu B B, Li H M, Gao S L, et al. Metalens-integrated compact imaging devices for wide-field microscopy[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(6): 066004.
- [5] Zeng X K, Zheng S Q, Cai Y, et al. High-spatial-resolution ultrafast framing imaging at 15 trillion frames per second by optical parametric amplification[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(5): 056002.
- [6] 贾天石,崔坤,薛玉龙,等.红外探测器测试系统噪声分析与抑制方法研究[J].激光与红外,2017,47(11):1373-1379.
Jia T S, Cui K, Xue Y L, et al. Research on noise analysis and suppression method of infrared detector test system[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(11): 1373-1379.
- [7] 乐丽珠,陆正杰,王小凤,等.空间噪声等效温差测试方法研究[J].红外技术,2016,38(6):519-523.
Le L Z, Lu Z J, Wang X F, et al. Test method of spatial noise equivalent temperature difference[J]. Infrared Technology, 2016, 38(6): 519-523.
- [8] 姬弘楨.热红外高灵敏度高光谱图像信息处理技术研究[D].上海:中国科学院上海技术物理研究所,2016:20-28.
Ji H Z. Research on the technology of high sensitivity and high spectral image information processing[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 20-28.
- [9] 宿军,王劲松,李延凤,等.红外热像仪性能参数检测系统校正方法研究[J].长春理工大学学报(自然科学版),2018,41(2):80-82.
Su J, Wang J S, Li Y F, et al. Study on the correction method of infrared thermal imager performance parameter testing system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(2): 80-82.
- [10] 曾戈虹.红外系统噪声等效温差机理分析与实例计算[J].红外技术,2012,34(2):63-67.
Zeng G H. Principles of infrared systems' NETD and theoretical calculations[J]. Infrared Technology, 2012, 34(2): 63-67.
- [11] 程丽鹏,张猛,王高,等.长波红外探测器的辐射定标[J].科学技术与工程,2016,16(28):195-198,203.
Cheng L P, Zhang M, Wang G, et al. Radiance calibration for long wave infrared detector[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(28): 195-198, 203.
- [12] 赵玥.距离及视场角对近红外热像仪精度影响的研究[D].沈阳:东北大学,2012:47-48.
Zhao Y. The study about the effect of the distance and the angle of vision on the precision of temperature measurement using infrared thermal imaging system[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012: 47-48.
- [13] 张元涛,曹开钦,孙德新,等.高灵敏度低噪声科学级 CMOS 图像传感器微光探测[J].激光与光电子学进展,2018,55(8):080401.
Zhang Y T, Cao K Q, Sun D X, et al. Low light level detection based on scientific CMOS image sensor with high sensitivity and low noise[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080401.
- [14] 徐世伟,张悦玲,王大鹏,等.制冷型 HgCdTe 红外推扫系统噪声等效温差精测与结果分析[J].激光与光电子学进展,2012,49(11):111202.
Xu S W, Zhang Y L, Wang D P, et al. Precision measurement and results analysis of noise equivalent temperature difference of cooled HgCdTe infrared push-broom system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 111202.
- [15] 张丽莎,刘兆军,马文坡,等.像素级数字积分红外成像技术研究[J].激光与光电子学进展,2016,53(9):091102.
Zhang L S, Liu Z J, Ma W P, et al. Infrared imaging technology based on pixel-level digital integration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091102.
- [16] Cao M, Cui W J. Research on NETD test system of medical infrared thermal imager based on CCD imaging technology[J]. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2016, 11(3): 311-316.
- [17] 徐立伟,李强,程高峰.红外成像系统 NETD 客观测量方法研究[J].激光与红外,2018,48(10):1248-1252.
Xu L W, Li Q, Cheng G F. Method of NETD-testing for thermal infrared imager[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(10): 1248-1252.
- [18] 刘收,杨旸,周龙,等.红外成像系统噪声等效温差参数测试算法及应用研究[J].计算机测量与控制,2015,23(3):975-978.
Liu S, Yang Y, Zhou L, et al. NETD test and implement for thermal imaging system[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(3): 975-978.
- [19] 曾素娣,陈海滨,胡桂玉.黑体辐射源空腔靶面温度均匀性测量方法探讨[J].计量与测试技术,2015,42(8):22-23.
Zeng S D, Chen H B, Hu G Y. Method for measuring temperature uniformity of cavity target surface in black body radiation source[J]. Metrology & Measurement Technique, 2015, 42(8): 22-23.