甚高灵敏度长波红外相机测试技术

龙 亮,张丽莎,吴立民

(北京空间机电研究所,北京 100094)

摘 要:对于温度灵敏度优于 10 mK 的长波红外相机,如何精确测量表征其灵敏度的指标-噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference,NETD),是一项重要的工作。首先,依照尽量缩短标准辐射传递链路减少误差项的原则,对比不同的测量方法,选取“黑体直接测量法”;其次,基于相机噪声理论模型,对不同温度点下的实测噪声分析,提出噪声修正方法对噪声进行修正,以此减小环境影响带来的测量误差;最后,基于 NETD 测量计算公式及不确定度分析理论对测试结果的不确定度进行分析评定。结果表明:针对甚高灵敏度长波红外相机所采用的测试设备及方法,可满足测试要求,测试结果相对不确定度在 7.7%左右。

关键词:噪声等效温差; 测试技术; 长波红外相机; 不确定度

中图分类号:TN362 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.0504001

Testing technique of ultra-high sensitivity long-wave infrared camera

Long Liang, Zhang Lisha, Wu Limin

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: For the long-wave infrared camera which has a temperature sensitivity less than 10 mK, it is an important work of testing its noise equivalent temperature difference (NETD) with high accuracy. Firstly, the "black body direct testing method" was chosen based on the principle of shortening the standard radiation transfer link and reducing the error terms after comparing different testing methods; Secondly, based on the theoretical noise model of the long-wave infrared camera, the testing noise data was analyzed at different temperatures, the noise correction method was proposed for reducing the testing error caused by the instability of environment. Finally, the uncertainty of testing results was analyzed based on the NETD calculation formula and analysis theory of uncertainty. The result shows that the testing device and methods are satisfied for the testing requirement of ultra-high sensitive long-wave infrared camera, the testing uncertainty is 7.7%.

Key words: noise equivalent temperature difference; testing technique; long-wave infrared camera; uncertainty

收稿日期:2017-12-10; **修订日期**:2018-01-15

基金项目:武器装备探索研究项目

作者简介:龙亮(1988-),男,工程师,硕士,主要从事红外遥感系统方面的研究。Email:longliang508@163.com

0 引 言

在国民经济和国防建设领域,高灵敏度红外成像技术具有非常重要的作用，其典型应用主要包括:资源调查、生态环境监测、灾害评估、海洋生态环境监测以及各种军事目标的探测和识别等。红外相机温度灵敏度越高,对所观测目标的温差细节信号获取能力越强,甚至能分辨目标内部结构微小温度差异,更高灵敏度的红外成像技术将在各个得到更广泛的应用。

噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference,NETD) 是表征红外相机温度灵敏度的重要指标之一,红外相机 NETD 指标在工程测试中,是通过黑体辐射源产生两个不同温度点信号值，待测相机对于信号辐射进行观测，基于两个温度点观测信号数据计算信号差及噪声值，再计算得到 NETD 值。对于红外各谱段成像技术,其中,长波红外成像技术由于探测器件噪声相对较大，以及相机系统自身杂散辐射量也较大，所以长波红外相机相对于中波红外相机温度灵敏度提升更为困难,NETD 指标相对于中波红外相机更大。目前,常用的长波红外遥感相机 NETD 多在几十到上百毫开 (mK) 之间。这样,在长波红外相机测试过程中由仪器、环境等因素引起的测量不确定度相对于测量结果而言比值很小,测量相对不确定度小,测量结果精确可信。但随着技术发展，目前已研制出 NETD 小于 10 mK 的甚高灵敏度长波红外相机，对于 NETD 在豪开量级的红外相机，一般测量不确定度相对于测量结果已在同一量级，如果不对引起测量不确定度的各类因素加以系统分析及抑制，测量结果的可信度就将大大降低,测量工作就将缺乏有效性。

文中针对一台 NETD 小于 10 mK 的甚高灵敏度长波红外相机,基于测试方法与测试链路分析,优选测试方法以尽量减少测试过程中引入的不确定因素环节,并针对不同温度点噪声受扰动进行特性分析,结合相机自身噪声模型,提出针对性噪声修正方法,合理修正测试噪声结果，最后依据不确定评定理论及测试计算公式,逐项分析各项因素的不确定度,最终计算得到测试结果的不确定度。旨在为甚高灵敏度红外相机的测试技术提供有效的参考及建议。

1 甚高灵敏度推扫式长波红外相机

甚高灵敏度推扫式长波红外相机采用了灵敏度提升技术,整个相机主要由相机主体、综合信息处理器、供配电模块、数据存储设备等组成,相机主体主要包括光学镜头、探测器、制冷装置等部分,成像系统组成框图如图 1 所示。

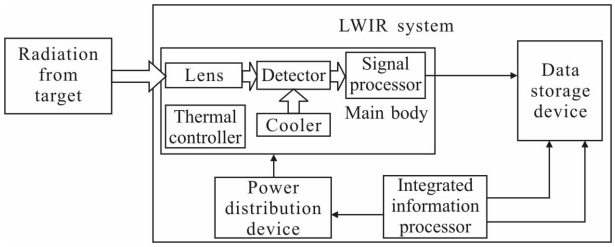

图 1 高灵敏度长波红外成像系统组成框图

Fig.1 Diagram of high sensitivity LWIR system

长波红外相机实物图如图 2 所示,其主要技术指标为:工作谱段 8~10 μm,视场 29°,焦距 50 mm,量化位数 18 bit,设计 NETD 值小于 10 mK(300 K 黑体)。

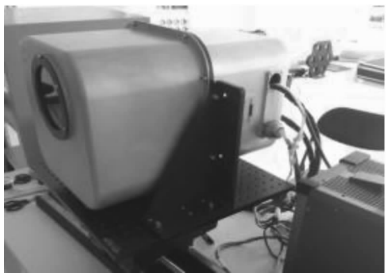

图 2 高灵敏度推扫式长波红外相机

Fig.2 High sensitivity push-broom LWIR camera

2 NETD 测试方法选择

依据国标 GB/T 17444-2013 “红外焦平面阵列参数测试方法”[1] 及现有工程经验,NETD 的通用测量计算公式为:

$$\mathrm{NETD}=\frac{\Delta T}{\Delta S/N} \tag{1}$$

式中:ΔT 有效测试温差;ΔS 为测试到的相机响应信号差;N 为通过测试及计算得到的噪声项。这三个参数的测试不确定度都将影响最终的 NETD 测试结果。其中 ΔT 的最小取值应考虑控温及测温精度、ΔT 的最大取值需取在待测系统的线性响应范围内。ΔS 的结果精确性主要同输出结果的精度有关，对于甚高灵敏度长波红外相机，相机输出数字图像位数越高,则 ΔS 结果相对越精确。而 N 是通过输出的数字

图像计算得到，不同的计算方法可计算得到不同类型的噪声(可分为空间噪声及时间噪声)，一般采用测试及计算时间噪声的算法，这样可以减小辐射源不均匀性对测试产生影响。

常用的 NETD 测试方法有两类：一种是通过靶标、辐射源(通常是黑体)、平行光管(或准直镜)来组合形成具有一定“目标-背景温差”的场景用于测试[2-3]，如图 3 所示；另一种是直接通过辐射源(辐射源发射面可有效覆盖相机全视场，通常是面源黑体)调节不同温度点用于测试，如图 4 所示。两种方法测量 NETD 时本质上没有区别，前者可以对辐射源辐射扩束，且比较方便进行 MTF 等其他参数测试，在重点考虑测量结果不确定度的情况下，后者相对前者所需测试设备更少，引入的不确定项会越少。所以，在辐射源发射面可以满足覆盖测试载荷全视场的情况下，考虑优先选用辐射源直接调温进行 NETD 测试。

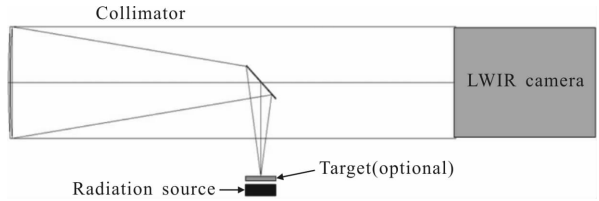

图 3 选用准直镜的测试图

Fig.3 Testing diagram with collimator

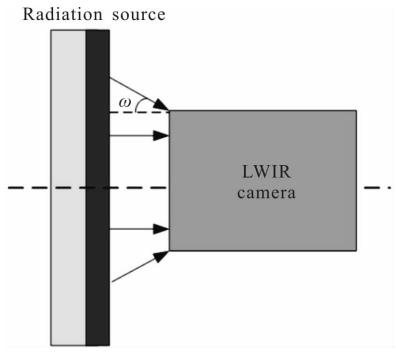

图 4 不选用准直镜的测试图

Fig.4 Testing diagram without collimator

3 NETD 测试及噪声修正

3.1 相机噪声理论分析

对于甚高灵敏度长波红外相机，建立了其噪声模型可表示为：

$$\sigma_{total}^2=N+\left(M\frac{C_{int}\Delta V}{2^m q\sqrt{12}}\right)^2+M\left(\frac{kTC_{int}}{q^2}+\frac{C_{int}^2 e_{comp}^2}{q^2}\right) \quad (2)$$

式中：σ_{total}^2 为总噪声电子数；N 为探测器主要噪声电子数；$\left(M\frac{C_{int}\Delta V}{2^m q\sqrt{12}}\right)^2$ 为量化噪声电子数；$M\left(\frac{kTC_{int}}{q^2}+\frac{C_{int}^2 e_{comp}^2}{q^2}\right)$ 为复位噪声与比较器噪声电子数；m 为最大量化位数；C_{int} 为积分电容；ΔV 为参考电压；q 为单个电子电荷量；k 为玻尔兹曼常数；T 为探测器工作温度；e_{comp} 为比较器输入噪声电压。根据所建立噪声模型，计算相机在不同测试温度点不同积分时间下的理论噪声值如表 1 所示。

表 1 不同测试温度点的理论噪声值

Tab.1 Noise in theory at different test temperature point

Temperature/℃	Noise value/DN
20	1.073 7
25	1.115 4
30	1.158 0
35	1.201 5

3.2 相机噪声实际测试

依据所选取的黑体直接测试法，选用目前黑体产品中稳定度及温度控制精度最高的以色列 CI 公司的 SR800R-7D 黑体产品作为标准黑体辐射源，其主要指标如表 2 所示。

表 2 CI SR800R-7D 黑体的主要技术参数

Tab.2 Main parameters of CI SR800R-7D black body

Parameter	Value
Working aperture/mm	178×178
Working temperature range/℃	5-90
Emissivity	0.97±0.02
Temperature accuracy/℃	0.007
Temperature stability/℃	±0.003

相机 NETD 测试实验室选择千级恒温实验室，实验室温度恒定调节范围为 20~30 ℃。NETD 测试现场图如图 5 所示。

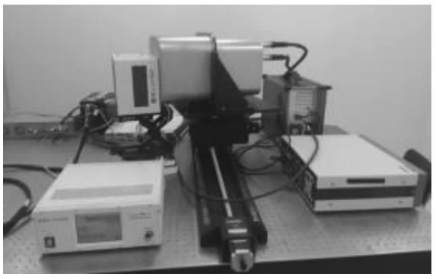

图 5 长波红外相机 NETD 测试现场

Fig.5 NETD testing scene of LWIR camera

实际测试时实验室温度调节在20、25、30 ℃三个环境温度点。黑体在 20~35 ℃之间每隔 5 ℃取一个测试温度点，每个温度点下红外相机对黑体连续成像至少 100 行图像，分别计算每个像元响应值的标准差，再求每个温度点下所有像元响应标准差的均值即为该温度点下的噪声实测值[4-6]。温度点 T 下的噪声计算公式如下：

$$N_T=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{F}(S_{ij}-\overline{S_i})^2}{F-1}}}{n} \tag{3}$$

式中：n 为相机有效像元总数；F 为计算噪声所连续成像的行数；S_{ij} 为第 i 个像元的第 j 行响应值；$\overline{S_i}$ 为第 i 个像元连续 F 行的响应均值。根据实测数据计算得到不同温度点噪声值如表 3 所示。

表 3 不同测试温度点的噪声实测值

Tab.3 Noise tested at different test temperature point

Testing noise at laboratory temperature of 20 ℃		Testing noise at laboratory temperature of 25 ℃		Testing noise at laboratory temperature of 30 ℃	
Black-body tempera-ture/℃	Noise value/DN	Blackbody tempera-ture/℃	Noise value/DN	Blackbody tempera-ture/℃	Noise value/DN
20	1.226 9	20	1.240 7	20	1.279 4
25	1.395 2	25	1.287 4	25	1.306 0
30	2.435 7	30	1.978 5	30	1.362 1
35	2.871 4	35	2.553 0	35	1.823 3

由表 3 和表 2 结果对比可见，对于同一测试温度点，当黑体温度同实验室环境温度匹配时，该温度点下测得的噪声值较低；对于同一实验室温度条件，黑体温度同实验室环境温度相差越大，所测得的噪声同理论值相差约越大。由此可推断：当黑体辐射源与测试环境温度差异较大时，辐射源与环境间会产生明显的辐射对流，辐射源的温度稳定性下降，偏离环境温度点较大温差的噪声实测值中包含大量除相机噪声之外的其他噪声；反之，对于与室验室温度相当的温度点测试，环境抖动影响较小，计算得到的噪声值更接近于相机自身噪声。

3.3 实测相机噪声修正及 NETD 测试结果

根据普朗克定理和相机噪声模型，不同温度点间的噪声差异主要由两方面原因。首先是不同温度辐射源产生的光子信号数量不同，会造成光子噪声差异。设 $T0$、$T1$ 温度点的对应的相机响应 DN 值分别为 DN_{T0}、DN_{T1}，对应的光子噪声分别为 N_{photo_T0}、N_{photo_T1}，(这里，光子噪声以其对应电荷数以步长 dQ 进行量化后的 DN 值表示)，则 $T1$ 温度点对应的光子噪声可参照 $T0$ 温度点的噪声及相关参数，由下式进行修正：

$$N_{photo_T1}=\sqrt{(DN_{T1}-DN_{T0})\cdot dQ+N_{photo_T0}^2} \tag{4}$$

其次是对于该高灵敏度长波红外相机，光子信号数量不同会造成比较器翻转和复位的次数不同，从而造成比较器噪声 ΔN_{comp} 和复位噪声 ΔN_{reset} 差异。$T0$、$T1$ 温度点的对应的翻转、复位次数(响应 DN 值)为 DN_{T0}、DN_{T1} 时，对应的比较器噪声分别为 N_{comp_T0}、N_{comp_T1}，复位噪声分别为 N_{reset_T0}、N_{reset_T1}(同样，噪声以其对应电荷数以步长 dQ 进行量化后的 DN 值表示)，则 $T1$ 温度点对应的比较器噪声和复位噪声可由下式进行修正：

$$N_{comp_T1}=\sqrt{(DN_{T1}-DN_{T0})\times\left(\frac{C_{int}\cdot v_{comp}}{q}\right)^2+N_{comp_T0}^2} \tag{5}$$

$$N_{reset_T1}=\sqrt{(DN_{T1}-DN_{T0})\times\frac{kTC_{int}}{q^2}+N_{reset_T0}^2} \tag{6}$$

综合考虑以上两方面因素，以受环境因素影响小的 $T0$ 温度点噪声为基准，通过一定的修正可得到 $T1$ 温度点噪声，再用于 NETD 的计算。利用上述公式修正后的噪声值如下表所示。

根据表 4 的噪声修正结果，依据公式(1)计算 NETD，其中 N 用高低温度点的噪声均值取平均计算。计算的中心温度点取 27.5 ℃，基于 20~35 ℃及 25~30 ℃两组温差数据计算得到 NETD 结果分别为 6.12 mK 和 6.08 mK。15 ℃温差下相机像元 NETD 统计如图 6 所示。

表 4 不同测试温度点噪声修正值

Tab.4 Noise by correction at different test temperature point

Blackbody temperature/℃	Noise value(in theory)/DN	Noise correction at laboratory temperature of 20 ℃		Noise correction at laboratory temperature of 25 ℃	
		Noise value (without correction)/DN	Noise value (with correction)/DN	Noise value (without correction)/DN	Noise value (with correction)/DN
20	1.073 7	1.226 9	1.226 9	1.240 7	1.227 2
25	1.115 4	1.395 2	1.283 6	1.287 4	1.287 4
30	1.158 0	2.435 7	1.331 2	1.978 5	1.330 9
35	1.201 5	2.871 4	1.386 5	2.553 0	1.381 1

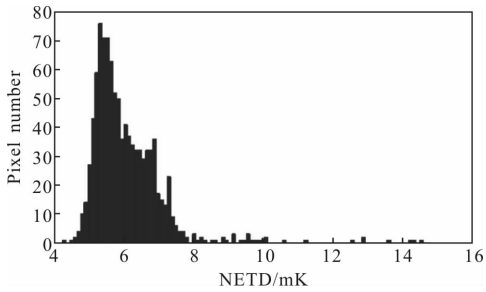

图 6 长波红外相机像元 NETD 测试结果统计

Fig.6 NETD testing result of the LWIR camera pixel

可以看出,采用经过修正后的噪声来计算NETD,在中心温度点相同时,测试结果在不同温差下相差很小。一方面是因为噪声修正后很大程度地减少了环境对辐射源的扰动影响;另一方面是因为相机在20~35 ℃温度区间响应线性度很好。后续对测试结果的不确定分析,主要基于 20 ℃与 35 ℃这两个温度点数据开展。

4 测试不确定度分析

4.1 不确定度分析理论

测量准确度表示测量结果与被测量真值之间的一致程度,是反映测量质量好坏的重要指标。间接测量情形下的合成标准不确定度公式为[7-8]:

$$u_c(y)=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)+2\sum_{1\leq i<j}^{m}\rho_{ij}\frac{\partial F}{\partial x_i}\frac{\partial F}{\partial x_j}u(x_i)u(x_j)} \quad (7)$$

式中:$u_c(y)$为输出量估计值 y 的标准不确定度;$u(x_i)$,$u(x_j)$为输入量估计值 x_i 和 x_j 的标准不确定度;$\frac{\partial F}{\partial x_i}$为函数 $F(X_1,X_2,\cdots,X_n)$在$(x_1,x_2,\cdots,x_n)$处的偏导数,称为灵敏系数;ρ_{ij} 为 X_i 和 X_j 在(x_i,x_j)处的相关系数。

相对不确定度的公式为:

$$\alpha=\frac{u_c(y)}{y}\times 100\% \quad (8)$$

4.2 相机测试结果不确定度分析

红外相机 NETD 测试的合成不确定度为:

$$u_{\mathrm{NETD}}^2=\left(\frac{\Delta T}{\Delta S}\right)^2\cdot u_N^2+\left(\frac{N}{\Delta S}\right)^2\cdot u_{\Delta T}^2+\left(\frac{N\cdot\Delta T}{\Delta S^2}\right)^2\cdot u_{\Delta S}^2+ 2\rho_{N\Delta T}\frac{\Delta T\cdot N}{\Delta S^2}u_N u_{\Delta T}+2\rho_{N\Delta S}\frac{\Delta T^2\cdot N}{\Delta S^3}u_N u_{\Delta S}+ 2\rho_{\Delta T\Delta S}\frac{\Delta T\cdot N^2}{\Delta S^3}u_{\Delta S}u_{\Delta T} \quad (9)$$

式中:u_N、$u_{\Delta T}$、$u_{\Delta S}$ 分别为噪声、温差、响应信号的测试不确定度。$u_{\Delta T}$ 可认为是黑体测温不确定度引起的,所用黑体标称温度精度 0.007 K,因此取 $u_{\Delta T}$ 为 0.014 K,主要受测试响应过程中黑体不稳定等因素影响,通过 0.014 K 的对应相机响应变化值计算得到 $u_{\Delta S}$ 取 3DN,u_N 为噪声的不确定度,通过同一条件下多次测试噪声值,得到噪声值序列,求序列的标准差得到 u_N 为 0.1DN。$\rho_{N\Delta T}$、$\rho_{N\Delta S}$、$\rho_{\Delta T\Delta S}$ 为三个测试参量的相关系数,由不确定度评定理论可知,三者取值最大为 1。

针对在 15 K 温差条件下得到的 6.12 mK NETD 测试结果进行不确定度分析,相关系数均取 0 时,得到 u_{NETD} 为 0.468 mK,相关系数均取 1 时,得到 u_{NETD} 为 0.480 mK。对应相对不确定度分别为 7.65%与7.84%。

5 结 论

文中针对甚高灵敏度长波红外相机温度灵敏度表征指标-噪声等效温差(NETD)的测试工作如何获得更为精确可信的测试结果,首先基于测试方法与测试链路分析,选用了黑体直接测量法进行 NETD 测试,减少了测试过程中引入的不确定因素环节;然后,在测试噪声分析中,创新性地基于相机噪声模型对不同温度点下相机测试噪声进行了合理修正,有效减小了测试环境扰动对噪声测试结果的不利影响。最后,通过不确定度评定分析,对测试计算公式各项参数的不确定度逐项进行了分析,合成了总的不确定度,最终验证了所采用测试方法及数据计算处理方法的科学有效性:在 6.12 mK 的NETD 测试结果中的相对不确定度在 7.7%左右。这为甚高灵敏度红外相机的测试技术发展提供了有效的参考及建议。

参考文献：

[1] GB-T 17444-2013.Technical manual of IRFPA characteristic parameters test[S], 2013. (in Chinese)

[2] Wei Dong, Xu Shiwei, Wang Dapeng. Comparison and analysis on NETD testing of infrared system [J]. ***Electro-Optic Technology Applicationg***, 2012, 27(6): 38-41. (in Chinese)

[3] Chu Hua, Wan Qiang, Li Wei, et al. Engineering measurement method of NETD for thermal infrared imager [J]. ***Laser & Infrared***, 2016, 46(12): 1496-1499. (in Chinese)

[4] Liu Bin, Wang Jie, Dong Jianting. Parameters test of long wave infrared imaging system based on 512×6 TDI detector [J]. ***Semiconductor Optoelectronics***, 2016, 37(3): 430-434. (in Chinese)

[5] Tian Qijie, Chang Songtao, Qiao Yanfeng, et al. Radiometric calibration based on low-temperature area blackbody for infrared systems with high dynamic range[J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2017, 46(4): 0412003. (in Chinese)

[6] Lai Fuwen, Zhang Zhijie, Zhou Hanchang, et al. Measurement and analysis of noise equivalent temperature difference Based on high temperature background [J]. ***Infrared Technology***, 2015(4): 311-313. (in Chinese)

[7] Long Liang, Wang Shitao, Zhou Feng. Research on calculation method of space remote sensor′s radiometric calibration accuracy [J]. ***Spacecraft Recovery & Remote Sensing***, 2012, 33(6): 51-55. (in Chinese)

[8] Sha Dingguo. Error Analysis and Measurement Uncertainty Evaluation [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2006: 124-151. (in Chinese)

[9] Guo Lihong, Guo Hanzhou, Yang Ciyin, et al. Improvement of radiation measurement precision for target by using atmosphere-corrected coefficients [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2016, 24(8): 1871. (in Chinese)

[10] Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision [J]. ***Chinese Optics***, 2012, 5 (3): 235-241. (in Chinese)

[11] An Chengbin, Wan Ying. Analysis of NETD test for thermal imaging system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(3): 414-417. (in Chinese)

[12] Li Yingwen, Chen Fusheng, Yang Changcheng, et al. Introduction to infrared test standard transferd test standard transter [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(z1): 119-123. (in Chinese)

[13] Zou Qianjin, Liu Lianwei, Chen Qianrong, et al. Calibration experiments of infrared detecting system with fixed focal length [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(12): 1204004. (in Chinese)

[14] Wu Xueming, Wang Haiyan, Kou Tian, et al. Test of infrared search and track system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(5): 0504003. (in Chinese)