

〈测量技术〉

空间噪声等效温差测试方法研究

乐丽珠¹, 陆正杰², 王小凤², 于 闻¹, 杨 帆¹, 张 成¹

(1.昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2.西北大学信息科学与技术学院, 陕西 西安 710127)

摘要: 噪声等效温差 (NETD) 是热像仪主要性能参数之一。对空间噪声等效温差 (spatial-NETD) 的测试方法进行研究, 完善空间噪声等效温差测试技术, 并对测试结果进行分析比较, 指出空间噪声等效温差测试的重要性, 为空间噪声等效温差在热像仪性能测试中的应用提供依据。

关键词: 噪声等效温差; 时间噪声等效温差; 空间噪声等效温差; 信号传递函数

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2016)06-0519-05

Test Method of Spatial Noise Equivalent Temperature Difference

YUE Lizhu¹, LU Zhengjie², WANG Xiaofeng², YU Wen¹, YANG Fan¹, ZHANG Cheng¹

(1.Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2.Northwestern University Information Science and Technology Institute, Xi'an 710127, China)

Abstract: Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) is one of the signs of infrared thermal imaging system performance index. In this paper, Spatial Noise Equivalent Temperature Difference (S-NETD) was studied, the testing technology of S-NETD was improved, the test results were compared, and the importance of the test of S-NETD was pointed out. The basis for the application of S-NETD in the thermal imager performance test is provided.

Key words: noise equivalent temperature difference, temporal noise equivalent temperature difference, spatial noise equivalent temperature difference, signal transfer function

0 引言

随着科学技术的发展及武器装备的更新换代, 用户对军用光电产品的要求也必然会越来越高、越来越严格。为了满足越来越多产品尤其是新产品更精确、快速的测试要求, 更加准确全面地反映热像仪的性能高低, 用户对热像仪主要性能参数之一——噪声等效温差 (noise equivalent temperature difference, NETD) 的测试提出了新的要求。热成像系统噪声按三维噪声模型可划分为 7 个噪声分量, 目前对热像仪的评价中测量的仅仅是时间噪声等效温差 (temporal-NETD), 不能全面反映热像仪噪声的大小。由于热像仪技术的进步, 仅根据 temporal-NETD 值已经很难对目前多种类型的热像仪进行信噪性能的比较, 也不能全面地评价热像仪性能。空间噪声等效温差 (spatial-NETD) 的测量则正好弥补了时间噪声等

效温差的不足, 有着十分重要的意义。

1 噪声等效温差测试系统

热像仪对测试图像进行观察, 当系统输出的信号电压峰值和噪声电压的均方根值之比为 1 时, 目标和背景的温度差为噪声等效温差 (NETD)。热像仪 NETD 测试系统如图 1 所示。

2 目前 NETD 测试存在的问题

热成像系统噪声按三维噪声模型可划分为 7 个噪声分量, 目前对热像仪的评价中测量的仅仅是 temporal-NETD (T-NETD)。T-NETD 按频率范围可分为时间域低频噪声等效温差和时间域高频噪声等效温差。

时间域高频噪声使热像仪像元的输出随时间相对快速地变化, 将热像仪输出的时间域高频噪声转换

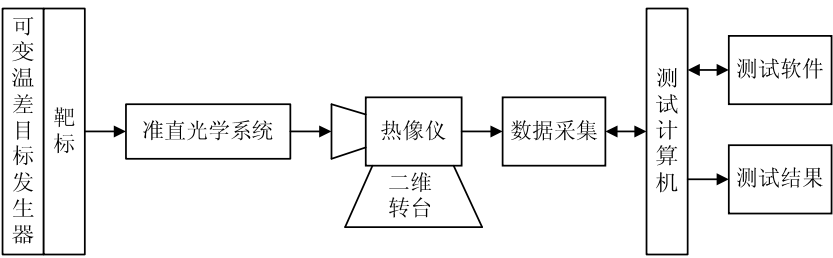


图1 热像仪 NETD 测试系统示意图 Fig.1 Thermal imager test system of NETD schematic diagram

为靶标的温差，其量值称为时间域高频噪声等效温差。

信号传递函数（signal transfer function, SiTF）定义为热像仪入瞳孔径上的输入信号变量的输出信号函数。SiTF 是对红外成像系统进行客观评价的参数，它不受观察者主观判断差异的影响。

通过试验可以看出，同一热像仪视场内不同区域的 SiTF、噪声、非均匀性都不相同，通常测出的结果是测量区域内的 T-NETD 平均值，仅仅能反映热像仪的平均 SiTF 和平均噪声的情况，无法反映出热像仪视场内任意点的 SiTF 和噪声的高低。要全面反映视场内每一个空间点（每一个像素点）的高频时间噪声需要对每个点进行逐一统计计算。

从噪声的三维分析可知现有 T-NETD 的检测结果不能全面反映热像仪的信噪性能的高低，T-NETD 只能描述那些帧与帧之间随着时间变化的噪声。对凝视型热像仪来说，从信号处理不均匀和焦平面不均匀性引起的噪声对系统噪声有重大贡献，甚至占据主要地位，仅从 T-NETD 数值不能全面的反映出热像仪的噪声强弱、均匀性等。

从以上分析的 T-NETD 的局限性来看，现在的 T-NETD 测试已经很难满足对产品越来越全面、越来越精确的要求。

3 空间噪声等效温差

时间噪声（ N_{tvh} ）和空间噪声（ N_{vh} ）能进一步分成高频和低频分量，见表 1。

表 1 N_{tvh} 和 N_{vh} 的高频和低频分量

Table 1 High frequency and low frequency components of N_{tvh} and N_{vh}

3D 噪声分量	频率分量	串扫描	并扫描	凝视阵列
N_{tvh}	高	噪声等效温差	噪声等效温差	噪声等效温差
	低	1/f 噪声	1/f 噪声	1/f 噪声
N_{vh}	高	-	-	固定图案噪声
	低	非均匀性	非均匀性	非均匀性

噪声等效温差针对高频时间噪声，而低频时间噪声就是 1/f 噪声。高频空间噪声是固定图案噪声，低频空间噪声是非均匀性。观察者同时看到空间和时间噪声的影响。低频分量表现为监视器上出现条带或监视器上的亮度变化，它影响空间频率最小可分辨温度的结果。

热像仪的空间噪声包括空间低频噪声（即非均匀性）和空间高频噪声（即固定模式噪声 FPN），是热像仪噪声中不随时间变化的噪声等效输入温差。将热像仪的空间噪声转换为靶标的温差，其量值称为空间噪声等效温差（S-NETD）。

4 S-NETD 的测试方法

1) 将热像仪增益、电平设置为定值。将热像仪对准测量装置准直光管的视场中心，调整热像仪焦距，使之成像清晰，用刀口靶标测量出热像仪此时的 SiTF。

2) 保持上述设置不变，换用空靶或者大开口的矩形或圆形靶标，将温差设置为 0。

3) 设置图像采集帧数，采集由被测热像仪生成的短时间连续图像视频序列（假设 1/f 噪声的影响可以忽略不计）。

4) 待黑体温度稳定，采集一个由待测热像仪生成的热图像视频序列（假设 1/f 噪声的影响可以忽略不计），一般采集 100 帧以上，将其图像存入测试计算机中。

5) 对采集的各帧图像中的每个像素进行时间平均，所采集的各帧图像由一帧图像取代，被测热像仪视场中被分析区域的空间噪声（或整个热像图像的空间噪声）按被分析区域内不同像素的视频电压值随空间变化的标准偏差计算。

6) 将以数字视频电平为单位的空间噪声计算值转换为以温差为单位的 S-NETD 值：

$$S-NETD = \text{噪声电压均方根值} / SiTF$$

5 实测结果

对 288×4 二代扫描型热像仪，非制冷凝视型热

像仪和制冷扫描型热像仪,一代和二代扫描型热像仪,二代制凝视型热像仪和二代制冷扫描型热像仪分别进行 T-NETD 和 S-NETD 测试,并对测试数据进行分析。

1) 288×4 二代扫描型热像仪测试

从图2可以看出热像仪图像行与行之间 NETD 差异是无规律性的、随机的,热像仪图像列与列之间差异有一定的规律性,体现了热像仪的非均匀性。经过大量的测试比较,测试数据见图3~图5,发现二代扫描型热像仪行 S-NETD 相对较小,而每列的 S-NETD 相对较大,S-NETD 的测量能反映固定模式噪声和非均匀性的好坏。对同一热像仪在不同增益下进行 S-NETD 的测量,发现 S-NETD 值随增益的增大而减小,热像仪图像随增益变化而变化。其中列和行 S-NETD 的值是波动的,但总体趋势是随增益的增大而减小的。其深层原因在探索中。

2) 多种热像仪测试

从表2、表3看出,非制凝视型热像仪的 T-NETD 较制冷扫描型热像仪小,但非均匀性要差一些,实际上制冷扫描型热像仪的成像质量比非制凝视型热像仪好,S-NETD 的测量结果也恰好弥补了 T-NETD 的这一不足。以前只通过 T-NETD 来评价热像仪显然是不全面的。综合 T-NETD 和 S-NETD 两者来评价非制凝视型热像仪才更全面准确,也更利于对热像仪的综合评判。二代制冷焦平面凝视型热像仪和非制凝视型热像仪的 T-NETD 接近,但实际上制凝视型热像仪的成像质量比非制凝视型热像仪好,S-NETD 的测量结果也恰好反映了这一点。仅从 T-NETD 来评价一代和二代扫描型热像仪也是不够的,某些一代扫描热像仪的 T-NETD 和二代扫描热像仪的很接近,但二代扫描型热像仪的成像质量明显优于一代,S-NETD 也明显优于一代。

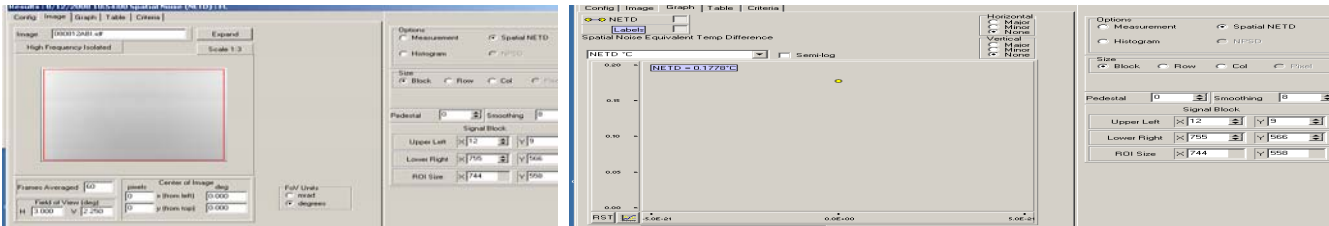
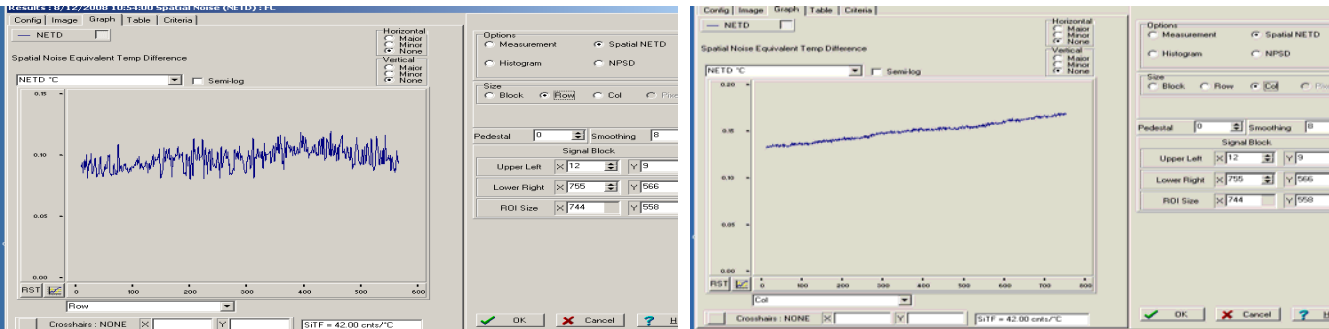


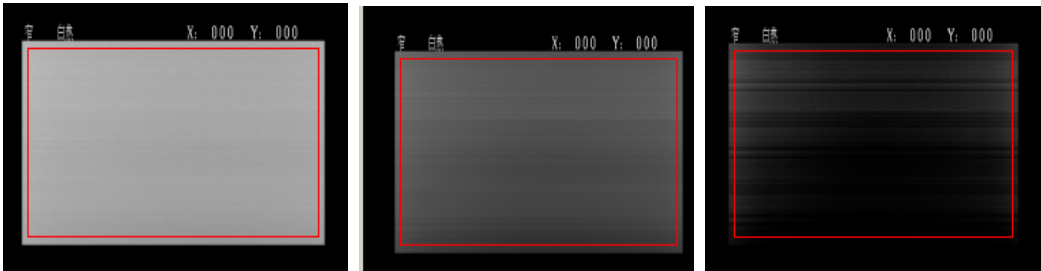
图2 288×4 扫描型热像仪的 S-NETD

Fig.2 S-NETD of 288×4 scanning thermal imager



(a) (b)
图3 扫描型热像仪的(a)行 S-NETD 曲线与(b)列 S-NETD 曲线

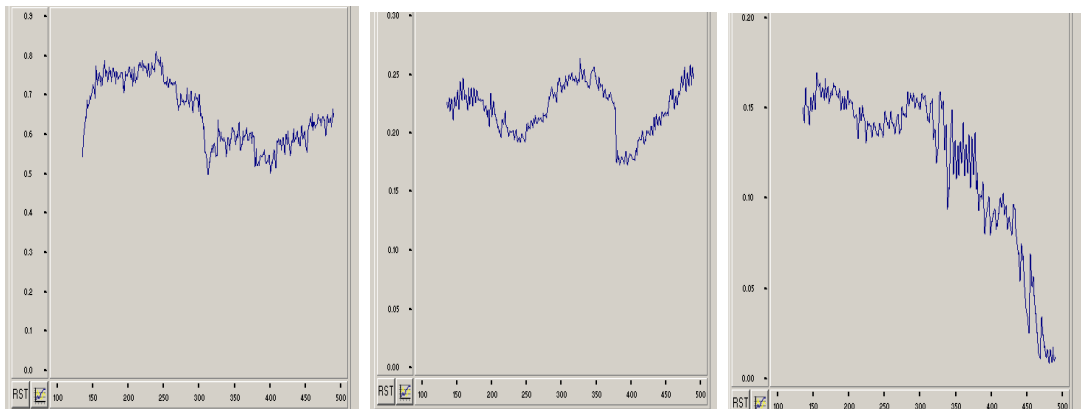
Fig.3 Row S-NETD (a) and column S-NETD of scanning thermal imager



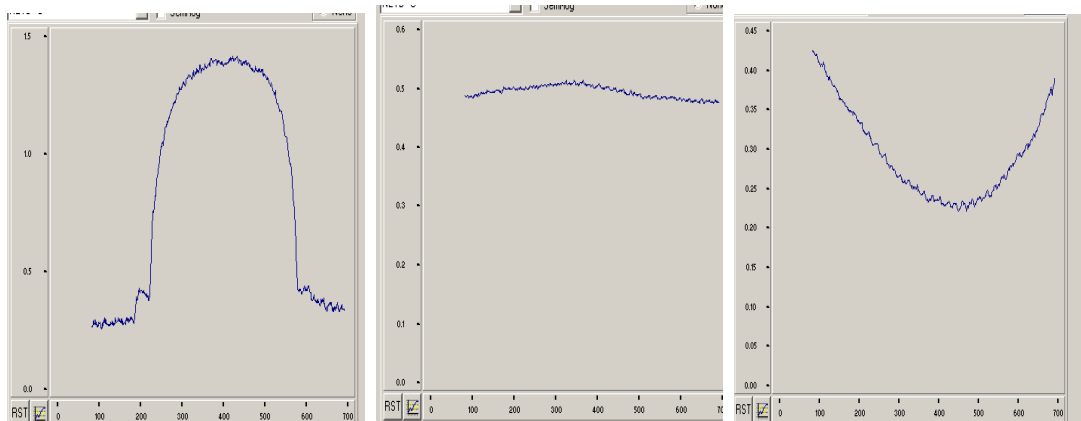
增益小时 small gain 增益中间值时 gain medium 增益大时 big gain

图4 热像仪图像随增益变化的情况

Fig.4 Situation of the thermal imager images varying with gain



行 S-NETD 随增益的增加而减小（从左至右） The row S-NETD decreases with the increasing of the gain(from left to right)



列 S-NETD 随增益的增加而减小（从左至右） The column S-NETD decreases with the increasing of the gain(from left to right)

图 5 列和行 S-NETD 随增益变化的情况 Fig.5 Situation of the row S-NETD and the column S-NETD varying with gain

表 2 制冷扫描型和非制冷凝视型热像仪 NETD 测试结果

Table 2 Test results of NETD of refrigeration scanning and non-refrigeration scanning thermal imager

参数	扫描型 1	凝视型 2 (带温控)	凝视型 3 (不带温控)
T-NETD/mK	124	80	91
S-NETD/mK	278	405.2	411.4
Uniformity	14.273%	23.632%	15.158%

表 3 二代制冷凝视型和非制冷凝视型热像仪 NETD 测试结果

Table 3 Test NETD results of the second generation thermal imager of refrigeration gaze type and non-refrigeration gaze type

参数	制冷凝视型热像仪	非制冷凝视型热像仪
T-NETD/mK	33	46
S-NETD/mK	257.0	388.2

从表 4、表 5 看出，二代制冷凝视型热像仪的 T-NETD 一般比二代制冷扫描型热像仪好，但实际成像质量比二代制冷扫描型热像仪稍差一些，盲元数也多一些，经过大量测试，二代制冷凝视型热像仪的

S-NETD 一般比二代制冷扫描型热像仪稍差一些。

表 4 一代和二代扫描型热像仪 NETD 测试结果

Table 4 Test NETD results of the first generation and the second generation scanning thermal imager

参数	一代扫描型热像仪	二代扫描型热像仪
T-NETD/mK	166	148
S-NETD/mK	359	178

表 5 二代制冷凝视型热像仪和二代制冷扫描型热像仪 NETD 测试结果

Table 5 Test NETD results of the second generation thermal imager of refrigeration gaze type and refrigeration scanning type

参数	二代制冷凝视型热像仪	二代制冷扫描型热像仪
T-NETD/mK	46	91
S-NETD/mK	257	178

S-NETD 的测试有效地弥补了 T-NETD 的不足，对热像仪的评价更加全面。因此，仅从时间相关的 NETD 来评价一代和二代扫描热像仪显然是不够全面

的,加入空间相关的 NETD 的测量才能对扫描型热像仪的信噪性能有一个更加准确全面的评价。

6 结论

随着科学技术的发展,对热像仪的各个性能参数都有了新的认识,对主要参数之一的 NETD 也有了更加全面的认识。随着三维噪声模型的建立,原有的一维噪声的测量已经暴露出了越来越多的不足,迫切需要改进。

二代热成像系统的信号中已包含了包括时间空间随机的噪声、时间无关空间相关的噪声、时间相关空间无关的噪声等各种噪声,如何更合理地评价其性能是目前需要探索的一个问题。

对时间域和空间域都进行测量,得出的 NETD 才是更全面的 NETD,才能更加准确全面地反映出产品的实际性能,也才能满足越来越高的各种测试需要。

参考文献:

- [1] 张敬贤,李玉丹,金伟其. 微光与夜视技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995.
ZHANG Jing-xian, LI Yu-dan, JIN Wei-qi. *Light and night vision technology*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [2] 金伟其. 热成像系统的静态性能模型研究的进展[J]. 电子学报, 1995, 23(10): 179-183.
JIN Wei-qi. Research progress of thermal imaging system static performance model[J]. *Electronic Journals*, 1995, 23(10): 179-183.
- [3] 兵器工业总公司. 军用热像仪通用规范: GJB 2340-1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
China North Industries Group Corporation. General Specification of Military Thermal Imager: GJB 2340-95[S]. Beijing: China Standard Press, 1995.
- [4] 常本康, 蔡毅. 红外成像阵列与系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
CHANG Ben-kang, CAI Yi. *Infrared Imaging Array and System*[M]. Beijing: Science press, 2006.
- [5] 吴宗凡, 柳美琳, 张绍举, 等. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
WU Zhong-fan, LIU Mei-lin, ZHANG Shao-ju, et al. *Infrared and Light Technology*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.
- [6] 钟文辉. 红外焦平面热成像仪参数测试系统[J]. 红外, 2006, 27(6): 29-34.
ZHONG Wen-hui. Parameter testing system for infrared focal plane thermal imaging system[J]. *Infrared*, 2006, 27(6): 29-34.
- [7] 李云红, 孙晓刚, 廖继红. 红外热像系统性能测试研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊): 458-462.
LI Yun-hong, SUN Xiao-gang, LIAO Ji-hong. Research on performance testing of thermal infrared imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(supplement): 458-462.
- [8] 赖富文, 张志杰, 周汉昌, 等. 高温背景下热像仪噪声等效温差测试与分析[J]. 红外技术, 2015, 37(4): 145-149.
LAI Fu-wen, ZHANG Zhi-jie, ZHOU Han-chang, et al. Measurement and analysis of noise equivalent temperature difference based on high temperature background[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(4): 145-149.
- [9] 王连振, 吴晗平, 李旭辉, 等. 红外成像系统综合性能评价方法研究[J]. 红外技术, 2015, 37(1): 506-511.
WAG Lian-zhen, WU Han-ping, LI Xu-hui, et al. Research on the methods of IR imaging system comprehensive performance evaluation[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(1): 506-511.