

热成像设备测试方法的实验及分析

雷 萍, 吴文华, 朱 祺
(63891 部队, 河南 洛阳 471003)

摘 要:设计了一种以信号标准化、温度控制精确化、结构微型化为要求的热成像设备关键指标测试方法。在实验室对噪声等效温差、最小可分辨温差、调制传递函数、信号传递函数等指标进行测试,对测试中的问题进行了分析,提出了在多种温度不同增益下测试噪声等效温差、利用神经网络算法在内多种算法提高分辨图像能力的方法,实验结果表明,方法有效可行,提高了对热成像设备检测的能力。

关键词:红外热成像;噪声等效温差;最小可分辨温差;调制传递函数

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.12

Analysis and experiment of testing method for infrared detector and imager

LEI Ping, WU Wen-hua, ZHU Qi

(No. 63891 Units of People's Liberation Army, Luoyang 471003, China)

Abstract: The key specifications test method for thermal imaging equipment is designed by ways of signal standardization, precise temperature control and structure miniaturization. Indexes of the noise equivalent temperature difference, minimum resolvable temperature difference, modulation transfer function, signal transfer function have been tested in the laboratory. And the image resolution is improved by a variety of algorithms including neural network algorithm. The experimental results show that method is effective and feasible. The capacity and ways of testing thermal imaging equipment are improved.

Key words: infrared imager detector; NETD; MRTD; MTF

1 引 言

随着红外技术的发展,红外热成像设备在军事上的应用越来越广泛,但针对热成像设备在使用过程中暴露出的技术故障,目前存在的一个重要问题是缺少检测设备或测试方法单一,远不能满足复杂的测试需求,文中针对热成像设备不同指标测试原理的不同和所测热成像设备的特殊性,设计了对热成像设备关键性能指标测试的方法,并在实验室对热成像设备噪声等效温差(NETD)、最小可分辨温差(MRTD)、调制传递函数(MTF)、信号传递函数(SiTF)等指标进行了测试及实验研究,验证了测试方法的适应性并发现了其局限性,提出了有效的解决方法,大大提高了部队对热成像设备检测和维修

保障的能力。

2 检测设备工作原理

热成像检测设备主要由红外平行光管、测试计算机系统(含视频采集卡)、通用机械平台、安装支架和电源组成,如图1所示。

红外平行光管产生标准目标信号,输入至待测热成像设备的热传感头,光信号经过光电转换,通过信号电缆将视频信号输入给采集卡;测试计算机处理后,将图像显示出来;测试者观察相关图像,结合黑体的温度状态,使用分析软件求出各指标及其特

作者简介:雷萍(1978-),女,硕士,主要从事光学测试与评估工作。E-mail:leiping0247@sina.com

收稿日期:2013-02-06

性曲线,以达到温度控制的精确化;利用 CCD 摄像机,在测试软件的指导下,导出系统整体及各部分的调制传递函数。

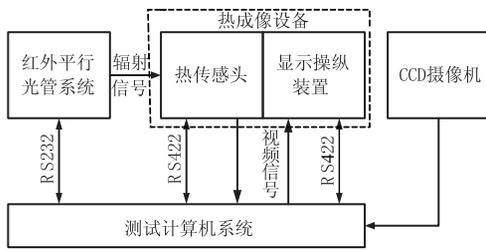


图1 热像检测仪测试框图

3 实验室测试方法分析

3.1 噪声等效温差

NETD 反映了热成像设备输出信号的背景噪声,影响观察距离和识别能力^[1]。广泛的被用来表示红外系统受信噪比影响后的探测灵敏度^[2]。如图 2 所示,测试计算机与发射源连接,控制红外源温度(控制背景板温度);目标靶置于背景板前方,准直镜的焦平面上;红外探测器接收红外信号并传递到显示器上,识别目标并评价信号。

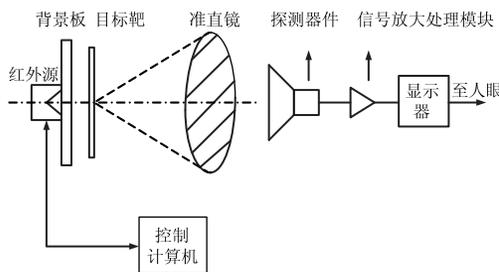


图2 NETD 测试示意图

其中,目标靶盘上方孔的边长要比红外探头的瞬态视场角(IFOV)大很多倍。然后选取固定的背景,同时温差 ΔT 也要取的大一些,且要比系统的 NETD 大数十倍,这样既确保系统输出的峰值信号电压 V_s 远大于均方根噪声电压 V_N ,又保证系统输出足够大的信噪比。测量温差、峰值信号电压和均方根噪声电压,按公式(1)计算 NETD 值。

$$\text{NETD} = \frac{\Delta T}{V_s/V_N} \quad (1)$$

3.2 最小可分辨温差

热成像设备的 MRTD 是综合评价系统温度分辨力和空间分辨力的重要参数。本次测试选用了目标图案为高、宽、带间距之比为 7:1:1 的四杆图(目标靶上有四杠孔),并将其放置在均匀背景中,目标和背景的温度从零开始逐渐增大,在确定的空间频率下,观察者刚好能分辨出四条带目标图案时,即可获得该空间频率的最小可分辨温差^[3],鉴于 MRTD 是与空间频率有关的函数,测量该函数曲线时最少要测量 4 个

空间频率,一般选用 $0.2f_0$ 、 $0.5f_0$ 、 $1.0f_0$ 、 $1.2f_0$ 四种频率,四杆图的空间频率按公式(2)计算。

$$f_r = \frac{1}{1000} \times \frac{f_0 (\text{cycle})}{2d (\text{mrad})} \quad (2)$$

其中, d 为条纹宽度; $f_0 = 1/(2 \cdot \text{DAS})$ 为特征频率;DAS 为热成像设备探测器对物镜的张角^[4]。

准直光学系统模拟目标位于无限远处,其出射光瞳应大于或等于被测热成像设备的入射光瞳。首先测量环境温度,然后选空间频率为 $0.2f_0$ 、 $0.5f_0$ 、 $1.0f_0$ 、 $1.2f_0$ 的 4 杆靶标依次放入指定位置(一般为准直镜的焦平面处),分别进行测量。得到温差后, MRTD 按公式(3)计算^[5]。

$$\text{MRTD}(f) = \frac{|\Delta T_+| + |\Delta T_-|}{2} \quad (3)$$

其中, $\Delta T_+ = T_1 - T_0$, $\Delta T_- = T_0 - T_2$ 。其中 T_0 、 T_1 、 T_2 分别为背景温度、热杆温度和冷杆温度。

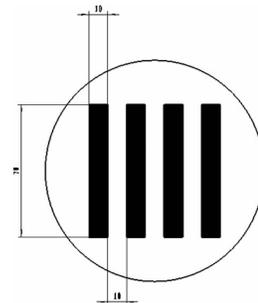


图3 MRTD 测试靶示意图

3.3 信号传递函数

SiTF 是响应度函数线性部分的斜率,响应度函数可提供待测系统增益(对比度)、线性、动态范围和饱和度的信息,是评价红外热成像设备性能的重要指标,可判断出热成像设备工作的线性工作范围^[6],如图 4 所示。

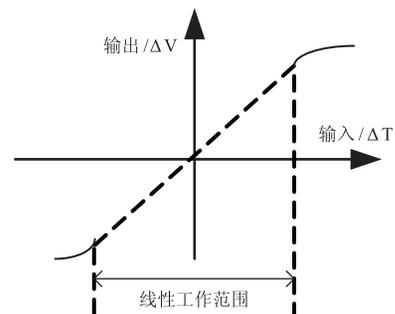


图4 SiTF 线性范围示意图

通过测试所得响应函数线性部分的 M 组数据,利用公式(4)计算 SiTF。

$$\text{SiTF} = \frac{M \sum_{i=1}^M \Delta T_i \sum_{i=1}^M \Delta V_i - \sum_{i=1}^M \Delta T_i \sum_{i=1}^M \Delta V_i}{M \sum_{i=1}^M \Delta T_i^2 - \sum_{i=1}^M \Delta T_i \sum_{i=1}^M \Delta V_i} \quad (4)$$

3.4 调制传递函数

红外热成像系统的 MTF_{SYS} ,包括热传感头(由红外光学系统和热探测器组成)的 MTF_{SEN} 、显示器件的 MTF_{MON} ,人眼的 MTF_{EYE} 等。在实验室测试时人眼因素的影响可忽略。系统的 MTF 值就是各个分系统的乘积,以及是在各个分系统共同作用下的结果。即系统的 MTF 按公式(5)和(6)计算。光学系统的传递函数^[6]为:

$$MTF_{OPT} = |F[\varphi_{OUT}(x)]/F[\varphi_{IN}(x)]| \quad (5)$$

其中,输出函数为 $\varphi_{OUT}(x)$;输入函数为 $\varphi_{IN}(x)$;自变量 x 为空间位置坐标。

$$MTF_{SYS} = MTF_{SEN} \times MTF_{MON} \times MTF_{EYE} \dots \quad (6)$$

在测试中采取逐个分开测量的手段,测量出各分系统的调制传递函数。如在现有的情况下,可以通过实验中 NETD、MRTD、SiTF 三者推算出热传感头的 MTF_{SEN} 。

4 测试中出现的问题及解决方法

为测试方便,设置典型值,如表 1 所示。

表 1 测试参数设置的典型值

指标	设置的典型值
<i>NETD</i> 测试参数	
温差 ΔT	3 ~ 8 K
同一温差采集帧数	30 ~ 100 帧
方孔靶尺寸	10.50 mm
<i>SiTF</i> 的测试参数	
温差 ΔT 上限	+ 10.01 K
温差 ΔT 下限	- 9.99 K
温差步长	1 K
同一温差采样帧数	30 帧 ~ 100 帧
重复测量次数	3 ~ 5 次
方孔尺度(边长)	10.50 mm
<i>MRTD</i> 测试参数	
温差 ΔT	2 ~ 4 K

4.1 增益问题和解决方法

(1)增益对噪声等效温差的影响

依照设置的测试参数,在目标靶板温度为 293K 时,背景温度由 291K 升至 295K 得到了一系列 NETD,如表 2 所示。

表 2 NETD 的测试值

背景温度/K	291	292	293	294	295
NETD/mK	29.5	15.2	9.3	7.4	6.0

从测试中发现,由于热成像检测设备信号的变化范围很宽,热成像设备接收装置接收到的最大输入信号和最小输入信号相差很大,这就造成了热成像设备在接受不同信号时所要求的增益值不同。比如在增

益小时,且增益达不到要求,出现了微弱信号得不到识别的现象;而在增益过大时,则出现了强信号经过放大使放大器达到饱和同样得不到识别的现象。

针对出现的问题,采用了在多种温度下,对热成像设备不同增益下(增益高时取若干个逐步增大的值)的噪声等效温差进行测试。从图 5 中可以看出:随着系统增益改变,信号传递函数也随之增大,噪声均方根值也同时增大;但噪声等效温差在增益较大的情况下不随增益的改变而改变。通过测试结果分析,噪声等效温差尽可能选取在系统增益较大固定值、增益不饱和的条件下测试。

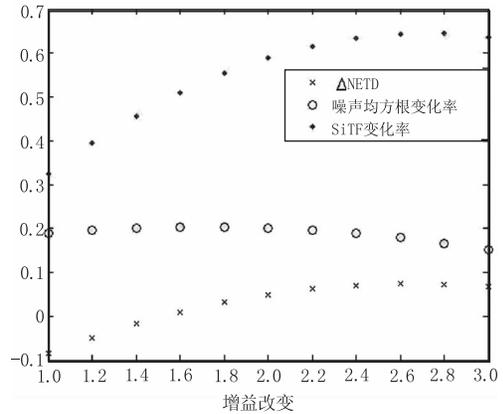


图 5 增益改变情况下 NETD 与噪声均方根、线性传递函数变化率的关系

(2)增益对线性传递函数的影响

在信号传递函数测试中,发现增益取值不同,线性传递函数也随之变化;增益越大,斜率越大,饱和速度快,其线性范围也越窄;随着温差的增大,响应函数的数值也在增大。

从图 6 中可以看出:增益取值不同,线性传递函数也随之变化;增益越大,斜率越大,饱和速度快,其线性范围也越窄;随着温差的增大,响应函数的数值也在增大;自动增益档位被激活,线性传递函数线性范围浮动。针对该现象,通过大量实验,获取适当的

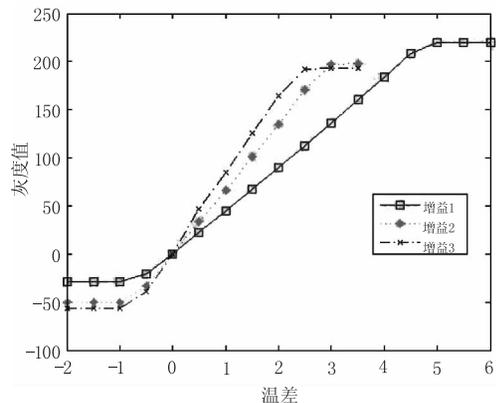


图 6 不同增益下线性传递函数变化

增益范围并在取值时尽可能使线性范围变宽,以达到准确测试的目的,同时为热成像检测设备性能的改进起到指导作用。

4.2 分辨能力问题和解决方法

在 MRTD 测试中,发现随着热成像设备探测空间频率增加,其 MRTD 值也在增加,且增速加快,分辨能力同时降低,MRTD 特性曲线如图 7 所示。

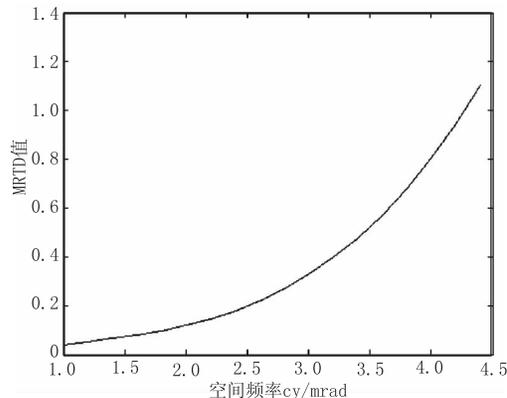
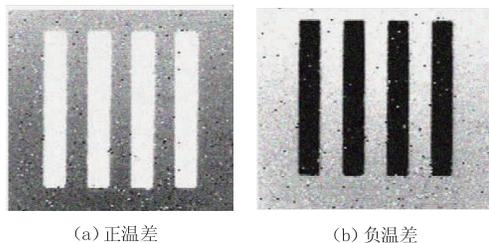


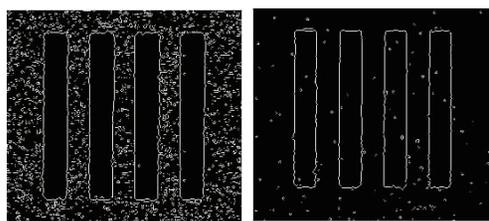
图 7 MRTD 特性曲线图

测试 MRTD 前,利用 Sobel 算子识别四杆靶并对其分辨^[7]。如图 8 所示为四杆靶正、负温差时的图像,分辨后的图像如图 9 所示。



(a) 正温差 (b) 负温差

图 8 MRTD 四杆靶视频图像



(a) 正温差 (b) 负温差

图 9 四杆靶板经 Sobel 算子边界识别

在测试中发现,若短时间观察大量的目标靶图像,会导致人眼视觉疲劳,影响人的主观判断能力,降低工作效率,同时由于测试每个值,在某个温度梯度上等待时间过长,即完成一组测试费时费力。

针对人眼疲劳问题,借助计算机利用神经网络算法在内多种算法自动识别记录温差,并用大量的实验数据进行了训练,达到智能测试的目的。

5 结束语

依据测试方案在实验室对热成像设备的噪声等效温差、最小可分辨温差、调制传递函数、信号传递

函数等指标进行了测试,发现增益对噪声等效温差和线性函数的影响、MRTD 分辨能力的影响等问题,提出了在多种温度不同增益下测试噪声等效温差、利用神经网络算法在内多种算法提高分辨图像能力的方法,结果证明方法有效可行,提高了部队对热成像设备检测的手段和能力。下一步将结合检测反馈数据,建立各型号热成像设备检验模型,使之具备完成快速、准确检测的能力。

参考文献:

- [1] Wang Xiaojian, Liu Yang, Chen Lei, et al. Discussion on the operation range of the infrared imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S2): 493-496. (in Chinese)
王晓剑,刘扬,陈蕾,等.基于 NETD 和 ΔT 红外点源目标作用距离方程的讨论[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊): 493-496.
- [2] Sun Xiaogang, Li Yunhong. Review of the development of temperature measurement technology with infrared thermal imager[J]. Laser and Infrared, 2008, 38(2): 101-104. (in Chinese)
孙晓刚,李云红.红外热像仪测温技术发展综述[J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 101-104.
- [3] Li Xudong, Ai Kecong, Zhang Anfeng. Research of the MRTD mathematical model for thermal imaging system [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(6): 38-42. (in Chinese)
李旭东,艾克聪,张安锋.热成像系统 MRTD 数学模型的研究[J]. 应用光学, 2004, 25(6): 38-42.
- [4] Jiang Guibing, Lan Tian, Ni Guoqi. Important parameters and testing methods of performance evaluation of thermal infrared imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S2): 470-473. (in Chinese)
姜贵彬,蓝天,倪国强.红外热成像系统评价的重要参数及测试方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊): 470-473.
- [5] Chen Shen, Zhang Xiaohui. Research on minimum resolvable temperature difference automatic test method of thermal imaging system [J]. Infrared Technology, 2010, 32(9): 509-512. (in Chinese)
陈深,张晓辉.红外热像仪 MRTD 自动检测方法研究[J]. 红外技术, 2010, 32(9): 509-512.
- [6] Li Xudong, Hu Tieli, Yue Wenlong et al. Research of the SiTF measurement for thermal imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(5): 21-25. (in Chinese)
李旭东,胡铁力,岳文龙,等.红外热像仪 SiTF 的测试研究[J]. 应用光学, 2005, 26(5): 21-25.
- [7] Qin Jianfei, Hu Jianghua. Thermal IR imaging auto-measurement system technique [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 8(3): 266-269. (in Chinese)
秦建飞,胡江华.热红外成像仪自动测量系统[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2007, 8(3): 266-269.