

系统与设计

凝视型红外光电成像系统主要参数的实验室测评分析

马冬梅¹, 胡明鹏^{1,2}, 孙军月³

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 北京长峰科威光电技术有限公司, 北京 100854)

摘要: 综合阐述了凝视型红外光电成像系统实验室主要参数测评, 并对最小可分辨温差 MRTD、系统调制传递函数 MTF 和噪声等效温差 NETD 等参数的测试方法进行了陈述, 给出了具体测试实验过程和实验结果, 对影响测试结果的因素进行了分析。

关键词: 凝视型红外光电成像系统; 性能参数测试; MRTD; MTF; NETD

中图分类号: TN214

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2007)08-0483-05

The Performance Evaluation for IR Staring Array Imaging Systems in Lab

MA Dong-mei¹, HU Ming-peng^{1,2}, SUN Jun-yue³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130022, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Beijing Changfeng Kewei Photoelectric Technology Co., Ltd, Beijing 100854, China)

Abstract: This paper presents the chief test parameter of staring infrared imaging systems in lab, such as Minimum Resolvable Temperature Difference (MRTD), Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) and system Modulation Transfer Function (MTF), and also discusses measurement implementations, specific test results and factors that affect measurement results.

Key words: IR staring array imaging systems; performance evaluation; MRTD and NETD and MTF

引言

近几年, 红外热成像系统在国内的应用越来越广泛, 随之而来的对红外热成像系统的性能评价工作也显现出重要性, 如何满足用户的实际需要, 准确评估成像系统性能、指导研制部门生产出满足用户需求的产品, 成为性能参数测试与质量评估技术工作的首要目的。

通过红外成像探测与红外光谱信息分析, 能掌握物体的空间位置、外形和物体表面状况、生物生理活动信息等; 而且不依赖于照明光, 可在“全黑”的条件下观察目标, 使人眼的视觉范围扩展到红外区。正是这些特点使得热成像技术在军事、公安、工业检测、医学诊断、建筑和科学研究等领域取得了飞速发展, 应用日益广泛。

随着红外光电成像系统的广泛应用, 也要求能够

提供一系列表征系统性能的参量, 以适应系统总体性能评价需要。同时, 可对需要的产品的主要技术参数提出明确的指标要求。

通过对凝视型红外光电成像系统参数测试研究工作, 我们对如何测评此类系统进行了初步的研究, 并取得一定进展。

凝视型红外光电成像系统主要用于在夜晚条件下通过物体的辐射温差进行图像探测与识别, 目标的对比度较低。国外对热成像系统的参数测试技术研究工作已开展多年^[1], 相应的测试设备类型较多。国内近几年由于热成像系统的应用日趋增加, 对系统的性能测评也提到议事日程。

热成像系统主要是通过对物体和背景及物体自身各部分辐射温度存在的温差, 对景物产生对比度不同的图像而产生热图效果, 使得人们可在图像显示器上看到暗场中物体的轮廓与细节, 而这种图像人眼是

不可能直接看到的。由此,把景物的辐射温差分辨作为热成像系统评价主要指标之一,即最小可分辨温差 MRTD(Minimum Resolvable Temperature Difference),它是对系统的几何分辨和温差分辨的一种综合评价。该参数表述了热成像系统探测目标表面温差和分辨目标细节的能力。

同时,系统的传递函数(system Modulation Transfer Function——MTF)是对空间几何(频域)分辨能力的评价,描述了系统二维图像空间的分辨特性。

而噪声等效温差 NETD (Noise Equivalent Temperature Difference)是对系统温差分辨能力(灵敏度)的评价,因此,以上3个参数是目前评价热成像系统性能的主要指标。我们通过实验室检测设备对以上3种指标进行了测试实验与技术分析。

1 MRTD 的测试与评价

现国外比较通用的测试方法为采用四杆靶作为目标,用黑体作为辐射源,通过对目标温差的改变提供可变温差目标源,热成像系统对其成像,通过对图像的评价实现最小可分辨温差的测量。评价方式分为主观评价和客观评价两种,主观评价方式是通过人眼对图像监视器屏幕上系统所成的四杆靶图像的观察,随着目标温差的降低,图像清晰度减弱,因而确定出

可分辨的极限对比度图像状态,其对应的目标温差即为此频率处的最小可分辨温差值。由于人眼的差异与长时间观察将导致人眼疲劳使得判断结果出现很大误差,因此,人们提出了客观评判的模式,其实现方法是采用一定的算法模型,通过测试相关参数计算 MRTD。

我们研究了采用神经网络技术实现智能化测试 MRTD 的新方法^[2-7]。MRTD 是由人的主观判断来定义的物理量,计算机智能化的发展使客观测量 MRTD 成为现实。神经网络部分模拟生物的脑和神经系统的结构和功能,能够进行自我学习,经过主观测试结果训练后的神经网络就具有了类似人的判断能力,其原理图如图1所示。

在实验研究中采用自行研制的神经网络 MRTD 图像判读软件,通过大量的实验数据训练神经网络,在运行阶段,当向网络输入训练时未曾见过的非样本时,也能完成由输入的 n 维空间到输出的 m 维空间的任意非线性的正确映射。这样就能用统一的标准来对红外热图进行准确判断,避免了个体差异、长时间工作疲劳等因素。尤其对于多台同类型的热像仪进行评价,这种方法能大大降低了工作量,减小了波动性。当目标发生器的温度控制精度为 0.01 K 的时候,训练后神经网络的判断结果与人眼观察结果相比,均方偏差为 0.01 K。

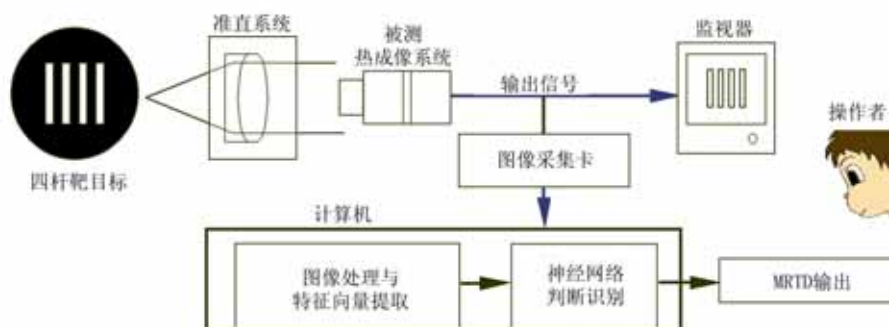


图1 神经网络测试 MRTD 工作原理图

Fig.1 The sketch map of testing MRTD by ANN



图2 四杆靶正负温差判读图像 Fig.2 Judge images of 4-bar images from positive difference to negative difference in temperature

在测试 MRTD 时 ,由于主观因素影响较大 ,因此 ,我们也在通过算法分析研究式(1)实现对 MRTD 的客观测评。

$$\text{MRTD} = k \cdot \text{NETD} / \text{MTF}$$

(1)

2 MTF 的测试与评价

对热成像系统整机的传递函数 (MTF) 测试是目前国内对光电成像系统包括可见光 CCD 成像系统综合评价的重要参数。它包括光学系统 (镜头) 与电子学系统 (信号接收与信号处理) 两个主要分系统传递函数的共同作用结果。因此 ,可真实地反映系统的空间分辨能力特性。由于光电成像系统的光电接收器像元尺寸有一定的大小 ,因此 ,在高于奈奎斯特频率的频率域中将出现图像混淆现象 ,采用常规的方法通过对点扩散函数或线扩散函数的采样与离散傅立叶变换而获得传递函数曲线的过程中将出现欠采样问题。

国外目前对光电采样成像系统的 MTF 测试大多采用最值法、狭缝扫描法和斜缝法以实现系统 MTF 的测试与计算^[8-12]。

我们通过斜缝法对凝视型红外光电成像系统的 MTF 进行了测试实验分析如图 4、图 5、图 6、图 7。通过狭缝的倾斜增加了水平方向上的有效空间采样频率 ,减少了混淆问题 ,在实验中通过对被测试系统采集的斜狭缝像数据的叠加、平均等处理获得系统的线扩散函数 ,进而经离散傅立叶变换计算出 MTF 传递函数曲线如图 7。在对实验数据的分析处理中需要注意空间噪声与时间噪声的去除、图像的截取、狭缝宽度与倾斜角度的选取等 ;同时 ,测试数据采集与处理应在系统工作线性区内 (可根据信号传递函数确定) ,从而保证测试结果的可靠性。

我们同时在开展采用二维 (2D) 离散傅立叶变换方法测试系统 MTF 的研究工作。

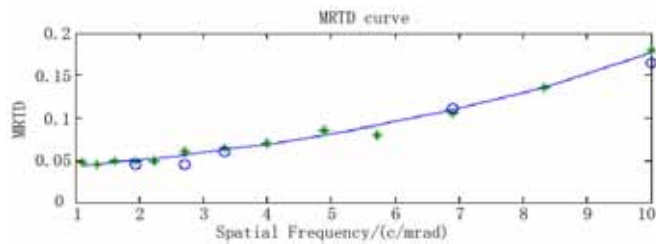


图 3 训练及测试数据的 MRTD 曲线和 log MRTD 曲线

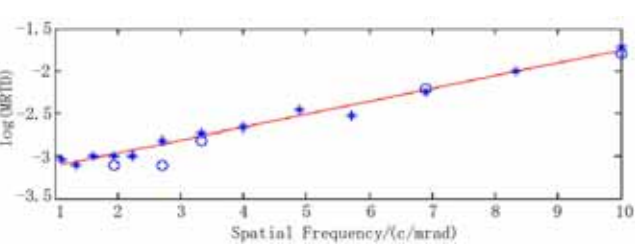


Fig.3 The curves of MRTD and log MRTD from training and testing

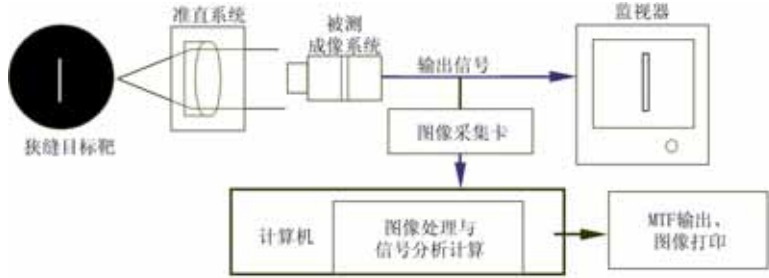


图 4 系统 MTF 测试工作原理图

Fig.4 Measurement principle of MTF of electro-optical systems

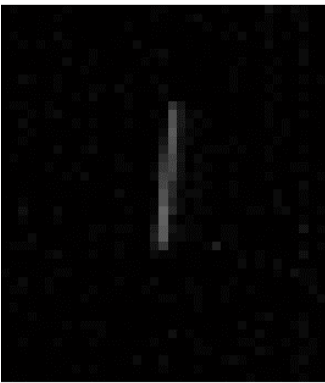


图 5 斜狭缝测试图像
Fig.5 Tested image of tilted slit

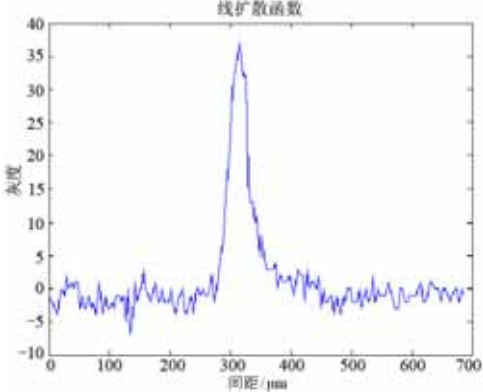


图 6 线扩散函数测试曲线
Fig.6 Testing curve of LSF

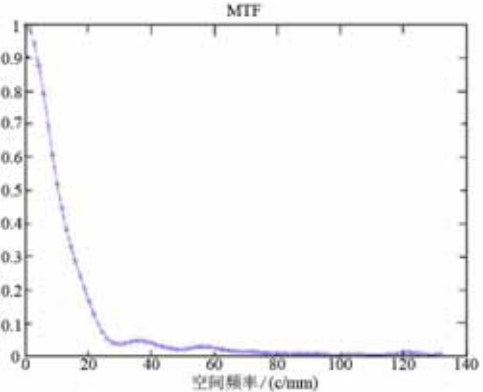


图 7 归一化 MTF 测试曲线
Fig.7 Testing curve of MTF

3 NETD 的测试与评价

NETD 的测试是红外成像系统不同于可见光成像系统的主要指标之一，由于热成像系统是通过物体辐射温度成像，系统本身与景象周围辐射环境将产生噪声，其对图像质量均有较大的影响。因此，为减少噪声对成像质量的影响，系统大多采用对探测器制冷方式降低噪声，提高信噪比。因此，对系统噪声的评价是红外成像系统性能评价的重要工作之一。

NETD 定义为在视场中产生的输出信号值等于噪声均方根值时目标和背景之间温度差，也就是系统能够识别的最小信号值。

根据 NETD 的定义 ,我们对系统 NETD 指标进行了测试实验分析^[13-17] (如图 8、图 9、图 10、图 11)。信号传递函数 (SiTF) 反映了系统的增益、线性度、动态范围、饱和特性及均匀性。通过测试信号传递函数 (SiTF) 和均方根噪声，计算获得系统的 NETD 指标：

$$NETD = V_{RMS} \times \Delta T / \Delta V = V_{RMS} / SiTF \tag{2}$$

测试方法采用圆孔目标靶测试出系统的线性动态范围，得到 $SiTF = \Delta V / \Delta T$ ，用均匀目标靶测试出系统的噪声均方根 V_{RMS} ，利用式(2)计算获得 NETD 数值。

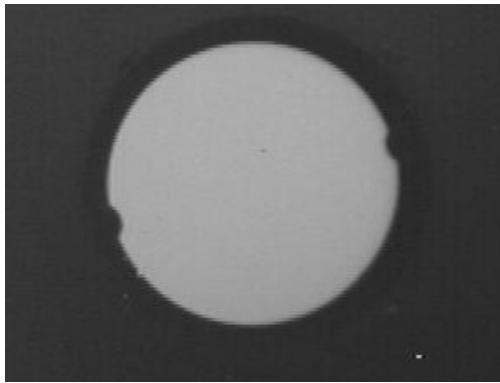


图 8 NETD 测试圆孔靶图像
Fig.8 Hole bar image of testing NETD

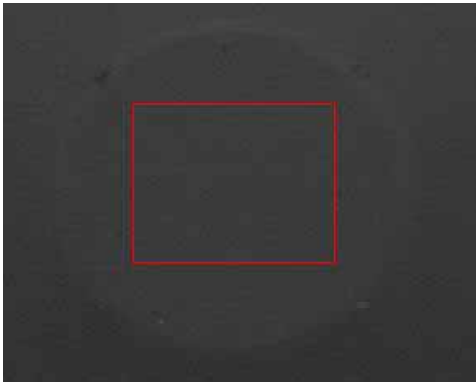


图 9 NETD 测试均匀目标靶图
Fig.9 Uniformity black bar of testing NETD

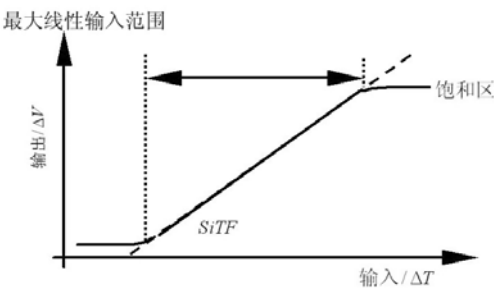


图 10 SiTF 测试曲线图 Fig.10 Graph of testing SiTF



图 11 测试实验现场 Fig.11 Photo of the experiment

4 测评汇总

通过对上述参数的测试研究分析，我们对凝视型红外成像系统的基本性能有一个较全面的了解与评价。测试软件是我们自行研制的，并通过反复多次实验在不断的完善中 (系统焦距的测量^[18]、像面均匀性测试等)，以满足不同类型热成像系统的性能评估需要。

在测试实验中发现，被测试系统的设置状态对测试结果有不同程度的影响。主要包括系统的积分时间、增益、测试环境、校正模式等；同时，对系统模拟输出端与数字输出端的信号测试也有较大的不同。因此，在对被测试系统进行某参数测试时，应标明系统在测试中所处的状态和测试环境温度，也可根据被测试系统的实际使用要求，确定测试时的系统设置。另外，被测试红外成像系统的校正模式应与实际使用

情况一致，以确保测试与实际使用的一致性。

尽管红外热成像系统的应用与性能评价工作在国外已开展多年，但国内开展此方面的工作是在近几年才普遍开始的，随着对红外成像系统性能要求的逐步提高，对其研制要求将有更高的复杂性，难度逐步增加，因此，全面、科学、准确地评价系统的性能将为红外热成像系统的设计、研制、加工与装调提供科学的指导依据。

参考文献：

- [1] Curtis Webb. History of FLIR testing[A]. *Proc. SPIE* [C], 2003, **5076**: 140.
- [2] 韩彦中, 王斧. 基于神经网络客观测量 MRTD 的方法探讨[J]. *应用光学*, 2004, **25**(1): 27 ~ 29.
- [3] 曲卫东, 李钟敏, 陈飞明, 等. 一种 MRTD、MDTD 客观测量方法的理论探讨[J]. *激光与红外*, 2000, **30**(3): 186 ~ 189.
- [4] Junyue Sun, Dongmei Ma. Intelligent MRTD testing for thermal imaging system using ANN[A]. *Proc. SPIE* [C], 2006, **6031**: 603111.
- [5] 孙军月, 马冬梅. 热成像系统主要性能的实验室评估[A]. *光学与光学工程—庆贺王大珩院士诞辰90周年学术论文集*[C], 2005.1: 350 ~ 353.
- [6] 孙军月, 马冬梅. 智能测量热成像系统 MRTD 的应用方法分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(4): 401 ~ 404.
- [7] 孙军月. 基于神经网络智能测量热成像系统 MRTD[D]. 长春光机所 2003 级硕士论文.
- [8] K.St. J Murphy, A. Marshall. MRTD and MTF Derivation for Focal Plane Array Systems [A]. *Proc. SPIE* [C], 1994, **2224**: 121.
- [9] T L Williams, Sira R&D Ltd, Chislehurst, Kent, Measurement of the of IR staring array imaging systems[A]. *Proc. SPIE* [C], 1992, **1689**: 53.
- [10] Mark A.Chambliss James A.Dawson Eric J.BORG, Measuring the MTF of undersampled STARING IRFPA sensors USING 2D discrete Fourier transform[A]. *Proc. SPIE* [C], 1995, **2470**: 312.
- [11] Robert Joyce,Leszek Swierkowski, Precise modulation transfer function measurements for focal plane array systems[A]. *Proc. SPIE* [C], 2003, **5076**: 157.
- [12] 李华, 陈良友, 雷刚, 等. 斜缝法热像仪 MTF 参数测量的探讨和实践[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(2): 201 ~ 203
- [13] 房红兵, 尹宝全, 皮德富. 凝视热成像系统 MTF 测试技术分析[J]. *红外与毫米波学报*, 1998, **17**(2): 125 ~ 128.
- [14] 马冬梅, 胡明鹏, 李宏壮. 凝视型红外光电系统噪声等效温差测量[J]. *光电工程*, 2007, **34**(8): (录用)。
- [15] 胡明鹏, 马冬梅, 李宏壮, 等. 凝视型成像系统噪声模型研究[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(10): (录用)。
- [16] 胡明鹏, 马冬梅, 刘志祥, 等. 凝视型热成像系统信号传递函数测试研究[J]. *光学仪器*, 2007, **29**(6): (录用)。
- [17] 李宏壮, 胡明鹏, 马冬梅. 光学系统 MTF 测量中的自动背景校正方法[J]. *光学仪器*. 2007, **29**(2): 82 ~ 86.
- [18] 孙军月, 马冬梅, 霍玉波. 应用四杆靶图像测量热成像系统焦距[J]. *红外技术*. 2006, **28**(4): 220 ~ 223.