

Review of Optical Performance Testing of Thermal Infrared Imaging System

Liwei Xu¹, Qiang Li¹, Huan Zhang²

¹Photoelectric Specialty, Department of Control Engineering, Academy of Armored Force, Beijing

²Fire Control Specialty, Department of Control Engineering, Academy of Armored Force, Beijing

Email: xlw1994@outlook.com

Received: Nov. 22nd, 2017; accepted: Dec. 6th, 2017; published: Dec. 13th, 2017

Abstract

In recent years, the evaluation of infrared imaging system is always a hot topic. It is an essential part of the development of infrared imaging system. The characteristics of infrared imaging system are analyzed, and the status of infrared camera system classification is introduced. With the development of time, the article introduces the development of infrared imaging system evaluation. Signal transfer function, the minimum resolution temperature difference of the system, modulation transfer function of the system and noise equivalent temperature difference are summarized and researched. Summed up the test methods are used frequently.

Keywords

Thermal Infrared Imaging System, Performance Evaluation, SiTF, MRTD, MTF, NETD

红外成像系统光学性能评估综述

徐立伟¹, 李 强¹, 张 环²

¹陆军装甲兵学院控制工程系光电工程教研室, 北京

²陆军装甲兵学院控制工程系火控工程教研室, 北京

Email: xlw1994@outlook.com

收稿日期: 2017年11月22日; 录用日期: 2017年12月6日; 发布日期: 2017年12月13日

摘 要

近些年来, 红外成像系统的性能评估一直备受关注, 是红外成像系统关键技术发展的不可分割的一部分, 文章对于红外成像系统的特性进行介绍, 通过时间轴的方式对系统评估的发展过程进行介绍, 并针对红外成像系统静态性能模型中的信号传递函数、最小可辨温差、调制传递函数和噪声等效温差主要性能参

文章引用: 徐立伟, 李强, 张环. 红外成像系统光学性能评估综述[J]. 光电子, 2017, 7(4): 117-126.

DOI: 10.12677/oe.2017.74017

数的测量方法原理进行研究综述。归纳出目前主要使用的测试方法。

关键词

红外成像系统, 性能参数, 信号传递函数, 系统最小可分辨温差, 系统调制传递函数, 噪声等效温差

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

扫描型探测器到无需扫描的凝视型探测器, 红外成像系统迅速发展。红外成像系统相对于微光夜视和可见光观瞄系统, 不需要借助月光、星光等微光以及其他的夜间照明物的协助, 它可在“全黑”的条件下观察到我们所需要的视场。

红外成像系统可以探测到之前事物存在所留下的印记, 可以探测到景物遮蔽下的隐藏目标, 例如, 可以发现人员以及车辆在某处场所逗留的热迹, 可以发现各种遮蔽物伪装下的真实行动目标。

红外成像系统在分辨区分物体方面不如微光夜视、可见光照明系统等, 红外成像几乎没有阴影, 没有立体感, 所传输的信息相对较少, 图像处理简单, 安全性高。

红外成像系统的波长工作范围为可见光范围以外, 大大开阔了人们的视野, 人们可以透过红外成像系统获取更多的信息, 其已经渐渐成为现代战争中必不可少的关键技术。

由于其良好的全天候探测能力, 被广泛应用于火控侦查、制导等方面, 那么如何使红外成像系统的最佳性能与其使用用途相匹配, 对红外成像系统进行准确的性能评价就显得尤为重要。

2. 红外成像系统类型和基本组成

红外成像系统有着不同的分类方法, 按照红外探测器的原理, 可以分为非制冷型和制冷型, 如果按照成像方式, 可以分为光机扫描型和凝视型。

扫描型红外成像系统对于目标的二维红外辐射进行逐行逐列进行处理, 转换为一维时间分布的电信号, 对其进行处理, 最后再以二维空间分布的可见光图像来呈现所接受的红外辐射图像。红外成像系统的基本组成部分有望远镜、光机扫描系统、红外探测器、制冷器、前置放大器、信号处理系统、和显示系统组成。随着红外成像系统的发展, 凝视型探测器的出现, 完全取消了扫描系统。非制冷型探测器也取消了制冷器部分。

3. 红外成像系统性能评估方法及其发展

模型主要分为两大类: 静态性能模型和动态性能模型

两种性能模型都包括目标与背景模块、大气衰减干扰模块、光学系统模块、传感器模块和电子信号系统模块。不同的是静态性能模型是由人眼观察识别, 动态性能模型是由机器视觉来完成自动目标识别 [1] [2]。

两种性能模型相比较而言, 静态性能模型中的目标处于静止, 所以我们在对红外成像系统进行预测时仅仅考虑到了目标背景的温差以及尺寸, 没有涉及到目标在运动过程中的细节变化和背景复杂噪声等因素; 在检测中基本用不到图像处理算法和探测跟踪识别算法, 没有复杂背景的变化, 静态模型也就不

能对红外成像系统进行全面的预测和评估,为了适应不断发展的红外成像系统技术,更加全面的了解红外成像技术在复杂背景下对于动态目标的探测识别,国外学者对与动态性能模型的研究不断展开,并取得了较好的成果和应用。本文主要针对红外成像系统的静态模型进行研究综述。

对于红外光学系统的性能评估在国外自上世纪七十年代起就已经开始不断地发展,在这几十年里,逐渐形成了一系列的对于红外成像系统的性能评估模型。

红外成像系统在国外的迅速发展和广泛使用,建立一种综合的红外成像系统性能评估模型在当时显得尤为重要,美国陆军的夜视实验室在1975年,建立了一种性能评估模型,自该模型建立以后,被广泛传播,全世界各国在该模型的基础上建立了对红外成像系统评估模型的相应研究。噪声等效温差、调制传递函数、最小可辨温差等参数为该模型中的主要测量对象[3]。在该模型当中,人眼传递函数用指数模型来表示,匹配滤波器和理性同步积分模型来表示 MRTD 模型当中的人眼视觉对图像的响应。由于其形成较早,当前阵列红外探测器采样效应对于模型的影响并没有在考虑范围之内。单单考虑了与时间有关的随机噪声影响,对于新一代红外成像系统的评价,是不能精准评价的。

时间推移,红外成像系统也在不断地发展变化,二代凝视型红外成像系统随之出现,1975年 NVL 模型难以满足新一代红外成像系统的评估需求,FLIR90、FLIR92 性能预测模型在 NVESD 实验室出现,在对离散采样系统的成像过程进行了描述时采用平均传递函数。三维噪声模型被引入来实现 NETD 的测量,红外成像过程中的各种噪声也建立了相应的理论基础[4]。在这个模型当中, MRTD 的测量依旧利用同步积分模型来表示眼/脑响应,水平 MRTD、垂直 MRTD、二维 MRTD 模型也由此提出并引入。

NVTherm 性能模型是在1999年形成,该模型优于 FLIR92 模型,能够更好的对 MRTD 参数进行评估,对于目标的识别特性有着更加精确的评估。

已有的性能评价模型针对焦平面阵列成像红外系统有着一定得局限性,适应红外成像系统接下来的发展趋势,荷兰 TNO 研究院通过对红外系统的研究与创新,依据人眼对于外界景物的抽象,提出一种三角方向辨别阈值法,即 TOD 测试法[3]。该方法是利用不同尺寸的等边三角形来进行描述,通过调整黑体来调整三角形目标与背景之间的温差产生测试靶标。在整个实验过程中,通过专业训练人员对不同三角目标的识别,我们可以获得多种实验数据,由此获得相应的三角尺寸,方向与阈值温差之间的对应关系曲线,在经由 TOD 实验准则,我们就可以评估相应的红外成像系统的探测能力,识别概率、作用距离。

TOD 测试方法与 Johnson 准则相类似,其中大气对于红外辐射的作用影响被考虑在内,场景中目标所拥有的各种特性,还有整个系统中所有固有的各种性能参数、成像因素,研究人员通过利用三角形的阈值可分辨温差来将以上两方面因素联系起来,不同的探测概率、作用距离远近的分辨等级也就由此测量评估。

再往后发展的过程中,又出现了 TRM3 性能评估模型,此模型是在之前性能评估模型的基础上进行了扩展优化,更多的应用在红外成像系统的成像作用距离方面,以早前的 MRTD 模型和 Johnson 准则为依托,评估测量相应参数以对应红外成像系统的不同作用任务[5]。

对于红外成像系统的性能评估模型研究方面,国内虽然起步较晚,近些年也取得了一定的进展,但是评价方法研究大多松散,在国内还未形成较为系统的研究论述,评价方法研究大多松散,在教科书中的比较系统的描述都是较为简化的模型,精度比较低,通过手工计算获取的曲线较为粗糙,只能得出大致结果。

早在八十年代,我国曾经引进一代红外成像系统性能的仿真软件,该模型主要针对美国串并扫方式的探测器模型,不适用于英国的 SPRITE 探测器,该软件在图像处理方面,尤其是目标背景图像模拟方面有很多可以借鉴的地方[6]。

九十年代,我国对红外成像技术的愈加重视,越来越多的学者参与到研究中来,骆清铭和刘贤德[7]

于 1991 年对红外成像系统的作用距离估算方法进行了分析研究,同年高稚允[8]进一步将红外目标缩小进行研究。在这之后,迟学芬[9]以信息领域理论对欠采样噪声进行了深入分析,并基于信息理论建立了较完善的成像系统性能模型,仔细分析研究了性能参数与噪声之间的联系。张海涛等人[10]提出基于矢量傅立叶变换的混叠效应分析方法,崔建平等[11]基于 ANN 法和信息理论将混叠看作系统的噪声对其进行评价;沈同圣[12]引入结构相似度评价混叠效应对于成像系统最终成像的影响,北理工金伟其等人系统开发了通用性较强的红外成像系统静态性能软件包(SPTIS),其中包含了多种性能参数的预测评估方法;陈自宽[13]对红外成像系统的各个部分传递函数进行研究,更加精确系统每部分所占影响,在系统仿真建模方面建立基础;艾克聪等人[14]建立了新的 MRTD 模型,深入分析 MRTD 与系统各个客观参数之间的定量关系,孙军月等人[15]应用神经网络对 MRTD 进行实验测量,以减少 MRTD 在主观测量中的多种不确定因素,童默颖[16][17]对焦平面阵列的建模方法进行了研究,试图将焦平面离散采样对于系统性能的影响以传递函数的形式表征出来;王晓蕊等人[18]针对 TOD 客观测量方法进行初步的研究,初步建立了 TOD 性能理论模型,同时采用机器视觉对红外成像系统进行 TOD 测试,进行初步的试验验证。

4. 红外成像系统检测主要参数研究

红外成像系统性能预测与评估的测试环境一直以实验室内为主,实验系统的精密性和大型化难以支撑现已配备红外成像系统在复杂环境条件下的检测,小型化、工业化仍有许多难题[19]。针对野外环境的复杂条件,能否短时间内对规模数量较大的红外成像系统进行充分的了解,调研国内红外成像系统过的研究现状,逐步建立小型化的红外成像系统检测平台,对红外成像系统的主要性能参数进行研究并准确检测显得尤为重要。

4.1. 信号传递函数 SiTF

基本测试原理:红外平行光管采用方孔(或圆孔)目标盘(图 1, 图 2),红外成像系统保持对比度、亮度不变,产生的红外图象经红外成像系统后输出视频信号,测试设备调节不同的黑体温差值,稳定后,采集该视频信号,经数据处理分别得出背景区和目标区的平均电压。该指标反映了红外成像系统可调节的动态范围,大小影响探测强弱不同目标的能力,观察的清晰程度,影响对目标的识别。从中可以得到被测系统的增益、线性度、动态范围、饱和度等信息。测试该指标时采用的是方形或圆形目标板。半月靶在测量该指标时也常被使用。其测量方式较为固定,在测量中,要着重注意环境条件影响。

采集卡接收到的信号输出 ΔV_{SYS} 为

$$\Delta V_{SYS} = \left[G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \frac{A_d}{4F^2} \frac{\partial M_e}{\partial T} T_{SYS}(\lambda) T_{TEST} d\lambda \right] \Delta T \quad (1)$$

式中, G 为红外成像系统的系统增益; $R(\lambda)$ 为红外成像系统系统响应度函数; 为红外成像系统有效探测元面积; F 为待测红外成像系统光学系统 f 数, $M_e(\lambda, T_B)$ 为光谱辐射度; $T_{TEST}(\lambda) = T_{COL}(\lambda) T_{ATM}(\lambda)$; $T_{COL}(\lambda)$ 为准直系统透过率; $T_{ATM}(\lambda)$ 为大气透过率; $T_{SYS}(\lambda)$ 为红外成像系统的透过率。信号传递函数 SiTF 为

$$SiTF = \frac{\Delta V_{SYS}}{\Delta T} \quad (2)$$

我们通过实际测试得到坐标轴上多个离散的点,也就是采集到的信号,但是这些测量的离散数据点由于各种因素的影响,通常会有着微小的偏差,所以我们需要对数据进行拟合使得数据点均匀分布在曲线两侧,求出最佳估计值:



Figure 1. Figure of Square hole target
图 1. 方孔目标盘



Figure 2. Figure of Round hole target
图 2. 圆孔目标盘

$$\Delta V_{SYS} = SiTF \Delta T + V_{offset} \quad (3)$$

其中偏置可以表示

$$V_{offset} = \overline{\Delta V} - SiTF \overline{\Delta T} \quad (4)$$

其中

$$\overline{\Delta T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N} \quad (5)$$

$$\overline{\Delta V} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta V_i}{N} \quad (6)$$

于是我们得到

$$SiTF = \frac{N \sum_{i=1}^N \Delta V_i \Delta T_i - \sum_{i=1}^N \Delta V_i \sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N \sum_{i=1}^N (\Delta T_i)^2 - \left(N \sum_{i=1}^N \Delta T_i \right)^2} \quad (7)$$

由于设备测量中的实验条件的不尽相同,可能导致 $SiTF$ 不同。可能是由于背景的温度在实验中未能精确测量或者在对红外成像系统传递信息的过程中目标与背景两者的传输率不相同导致偏置 V_{offset} 的出现,测试过程中的环境温度波动也可能造成偏值,在测量过程中应予以重视。

4.2. 噪声等效温差 $NETD$

基本测试原理:红外平行光管采用方孔目标盘,测试设备控制双黑体的温差 ΔT ,产生的红外图象经红外成像系统后输出视频信号,测试设备采集该视频信号后,经数据处理得出均方根噪声电压 U_n 和平均信号电压 U_s ,最后计算出测试结果。该指标反映了输出信号的背景噪声,描述了仪器大面积的温度灵敏度范围,它影响观察距离和识别能力[20] [21]。目前主要应用公式(8)公式(9)两种测量方式进行测量。

在热成像系统的 *NETD* 指标中, 国外经常使用 *NETD*、时间 *NETD*、空间 *NETD* 这三个指标[22], 这三种不同类型的 *NETD* 指标是由其测量的不同噪声所决定的, 尽管光子运动应该是由泊松分布来描述, 但是通常我们假设噪声符合正态分布, 实验数据的整体方差估计是以数据符合高斯密度分布曲线为前提的[23] [24]。

其中时间噪声模型, 是通过选取了 n 帧图像, 对每一帧图像都进行求取噪声均方根, 消除空间噪声的影响, 对于 n 帧图像的噪声均方根求其平均值作为系统时间噪声。空间噪声模型, 则是将选取的 n 帧图像进行平均值计算, 消除时间因素对于噪声的影响, 最后选定某个区域进行噪声均方根计算, 这时得到的就是空间噪声, σ_{TVH} 是三维噪声模型当中的分量, 该噪声分量综合考虑了时间、空间因素对于整个系统的影响, 所以选取其高频部分为 *NETD* 测试中的噪声均方根。

人眼对图像的分辨效果与视在信噪比有关。*NETD* 没有考虑视觉特性的影响。*NETD* 反映的是系统对于低空间频率的景物的温度分辨率, 例如测试靶标为方孔目标盘, 当测试目标是高频景物(目标与背景相对复杂)时, *NETD* 无法对其温度分辨性能的测量能力进行准确的判断。

测量 *NETD* 的测试方程为

$$NETD = \frac{\Delta T}{S/\sigma} \quad (8)$$

或者

$$NETD = \frac{\sigma}{SiTF} \quad (9)$$

目前国内各大科研机构相继引进国外的红外成像系统整机测试设备, 其中主要有美国 SBIR、Optikos、EOI 公司、法国 HGH 公司、以色列 CI 公司的测试产品。

在测试 *NETD* 的过程中, 现阶段利用以上公司测试产品主要应用两种方法进行测试: (1) 通过黑体与靶标的温差获得 S , 利用靶标或者黑体的选定区域获得 σ , 利用黑体显示的温度获得 ΔT , 利用公式(8)得到 *NETD*, (2) 利用黑体的温度变化获取温差信号 S 与温差 ΔT 的曲线关系 *SiTF*, 在选取温度的线性区域获得 σ , 利用公式(9)得到 *NETD*。

只采用了一组温差值测试的方法一, 测量耗费时间少, 但是在复杂条件下, 环境因素波动较大以及设备自身受到影响、测量误差或较大, 也无法确定系统成像时是否处于线性区域内, 不同温度点时信号传递函数处于非线性区域时的信息也无法获知。操作简单、耗时少的特点使得不少用户仍在继续使用这种方法, 利用方法二测量时用时较长, 操作较为复杂, 但是其是通过信号传递函数来求取, 所求的信号传递函数是多组温差值进行最小二乘拟合获得, 相较一组温差值的算法, 方法二尽可能地减小了误差偏大的可能性, 能确定是在系统线性区域内获得, 大大缩减了误差范围, 测试结果更为理想。

在传统的测量定义当中, *NETD* 的测量考虑了探测器和前置级的噪声, 传统的红外成像系统中 S 和 σ 有着同样的增益。现在被广泛应用的焦平面热成像系统前置级无输出, 在对系统的 *NETD* 测试过程中, 通过视频输出获取帧图像, 测试的图像包括了后端处理电路的噪声, 同时后端电路对于信号的非线性处理对 *NETD* 测试产生不同程度的影响。随着技术的发展, 红外成像系统的对于获取图像的处理能力在不断的增强, 技术指标得到了提升, 可视化效果也有着质的跳跃。这些图像处理能力的提升的同时, 导致了 *NETD* 测试变得更加复杂, 在实际测量的过程中, 对测试系统进行测量之后应该进行不同的情况分析, 应对不同的测试系统进行有针对性的测量和评估。

4.3. 调制传递函数 *MTF*

基本测试原理: 测量 *MTF* 的靶标为狭缝图, 其中狭缝宽度应小于 $0.2DAS$ (探测器对其物镜张角为

DAS), 高度大于 10 DAS, 每次位移不超过 0.05 DAS。调制传递函数 MTF 是评价红外成像系统性能的关键参数, 线性滤波理论是其基础, 在红外成像系统中, 把每一部分都看作是线性的、时间频率和空间频率稳定的, 它包括系统中的光学镜头与信号接收和处理的电子电路系统。因此, 整个系统的空间分辨能力特性也就能很好的表征。对于 MTF 的测量, 扫描法和干涉法都应用较多。其中点扩散法和倾斜边缘法在工业中应用较多。

由于光学系统中的接受元件有着尺寸限制, 在不属于奈奎斯特频率域内会有图像混叠现象出现, 通过点扩散函数或者线扩散函数, 利用常规方法进行采样再进行离散的傅立叶变换, 从而获得传递函数曲线, 在这个过程中会出现欠采样问题。

其测量方法主要分为扫描法、干涉法、激光散斑法。相比之前的扫描型红外成像系统, 扫描法针对凝视型红外成像系统的测量方法进行了改进, 主要采用斜缝法、最值法、狭缝扫描法。

最值法是通过测得所有 MTF 中的最大值和最小值, 求取其平均值。所有 MTF 中的最大值处在某一列或者某一行探测元的中间位置, 将狭缝靶标置于此就可以得到, 相反, 将狭缝靶放置到两层探测元的中间位置就可以测定所有 MTF 中的最小值。

狭缝扫描法则是通过扫描狭缝在一列探测元的所有位置, 得出 LSF (line spreading function 线扩散函数), 再得到 MTF 。

斜缝法是将狭缝倾斜放置, 在平移的过程中, 相当于在一个探测元上等间隔的平移数次, 提高采样频率, 求得结果也就相当于平移数次之后求取的平均值。

干涉法则是通过光干涉的方法, 我们可以得到不同空间频率的干涉条纹, 得出系统的光瞳函数, 再进而得到系统的 MTF 。

激光散斑法, 激光散斑是由无规则散射体被相干光照射产生的, 因此是一种随即过程, 通过统计方法的研究, 获取激光输入输出的强度分布、对比度, 其与系统调制传递函数具有相应的关系, 为:

$$PSD_{in}(\varepsilon, \eta) = |MTF|^2 \cdot PSD_{out}(\varepsilon, \eta) \quad (10)$$

利用激光散斑法是对整个成像系统 MTF 进行测试, 包括成像面, 其并不需要平行光管等复杂的红外光学系统, 测试它能直接反映整个成像面的系统 MTF , 并不需要复杂的红外光学系统。这样减少了测试难度, 还提高了测试的可靠性和精度。

4.4. 最小可分辨温差 $MRTD$

基本测试原理: 红外平行光管采用条状孔目标盘(图 3), 产生的红外图象在红外成像系统显示器上显示, 测试设备分别调节双黑体为正温差 ΔT_1 负温差 ΔT_2 , 是人眼刚好能分辨出 4 孔图案时, 记下平均温差 ΔT 。再分别换其它空间分辨率 f_{T_0} 的条状孔目标盘, 按同样方法测量, 最后的到一组平均温差 ΔT 值和空间分辨率 f_{T_0} 。测试设备就自动绘出最小可分辨温差曲线 $MRTD(f_{T_0})$ 。该指标反映了红外成像系统的热灵敏度, 也包含空间分辨特性, 是与野外性能有关的主观评价参数[25] [26]。客观测量的自动测量和快速性使之成为测量 $MRTD$ 的主要选择[27]。

$MRTD$ 一直以来的预测和测量就存在着矛盾, 矛盾的原因在于预测模型并没有考虑到测量时的探测器增益变化, 但是增益和对比度的调整使得测量值发生了变化, 导致预测值与测量值的不相符, 那么只有在预测时考虑到这些, 针对 $MRTD$ 模型中的缺陷进行完善, 以求的更为切合实测数据的模型。

$MRTD$ 测试技术分为主观 $MRTD$ 测试和客观 $MRTD$ 测试两类。一般概念, 直接用人眼观察成像的目视成像系统, 主观测量比较适合; 成像自动系统, 例如自动识别跟踪目标和定位等系统, 宜用客观的测量法来对其基本性能参数进行测量。 MTF 、 RMS 、 $SiTF$ 、 $NETD$ 、 PSD 等。对自动成像系统, 也可同时用主观测试 $MRTD$ 评定系统性能。由于传统的 $MRTD$ 测试技术不仅包括了红外系统自身的技术特征, 还包



Figure 3. Figure of Striped target
图3. 条状孔目标盘

括了人眼的主观因素，弊端越来越凸显出来，主观测量的使用逐渐减弱，客观测量技术在不断的发展，国内对于客观测量方法的研究主要在两方面，即直接测量法和间接测量法。间接法多数从视频中提取信息，直接法多数从显示屏上提取信息。目前直接测量法使用较多。

间接测量法，就是应用客观的 *MRTD* 模型，客观测量其中的性能参数，如 *MTF*、*NETD* 等，再考虑视觉特性通过性能参数之间的对应关系以求的 *MRTD*。理论 *MRTD* 为

$$MRTD(f_x) = k_i \frac{NETD_s}{MTF(f_x)} \sqrt{\beta_1 + \dots + \frac{\sigma_i^2}{\sigma_{TVH}^2} \beta_2 + \dots} \quad (11)$$

式中 k_i 是理论值与测量值相匹配的经验函数。 β_i 是对于不同噪声的模拟的人眼滤波器，*MTF*(f_x) 中包括了探测器、人眼、光学系统和电子系统的传递函数。

随着发展出现的 FLIR90 和 FLIR92 模型，其中引入了三维噪声模型，把噪声分解到时间、水平、垂直三位坐标系当中分解为 7 种噪声因子。提出并引入了水平 *MRTD*(f_x)、垂直 *MRTD*(f_y) 和二维 *MRTD*(f_{eff}) 模型。

NVTherm 模型于 19991 年提出，相较之前的模型，NVTherm 模型提压缩因子的概念，系统因伪响应带来的性能下降程度得以表示，*MRTD* 不再被限制在奈奎斯特频率内，提出新的人眼视觉模型。2005 年，NVESD 实验室提出 NVThermIP 模型，该模型替换了原有采用的约翰逊准则，新的 TTP 准则更加适用，对于过采样系统和前采样系统都有着良好的适用性。

直接测量法，现在所应用的测量方法主要分两种，一种是光度法，一种是四靶标图像识别法。就使直接从成像系统中提取四靶标图像信息，进行处理分析，假定存在一个阈值，可以区分目标和背景图像，从而决定 *MRTD*。阈值可以使单一阈值，但是结果偏差往往较大，所以多采用模糊决策理论或者神经网络为基础来确定阈值。利用图像处理和神经网络判读的方法前景广阔。

自从荷兰的 TNO 研究所提出一种表征红外成像系统性能的三角方向辨别阈值法-TOD 法，近些年来，国内的许多学者和研究人员对其进行较为深入的探讨和研究，TOD 的测试技术的思想和理论基础在研究中得到了深入的了解和介绍，并在此测试技术的应用上取得了一定的成果，初步建立了相应的 TOD 测试系统，并利用实验室现有条件和野外多种场景条件，对 TOD 测试技术进行试验对比研究，对其技术进行深入探讨。为适应迅速发展的红外成像系统，TOD 测试技术被认为是提高红外成像系统性能参数测试可信度，减少多种弊端，在未来可替代传统 *MRTD* 测试技术的一项有效的技术途径，国内相关单位及其研究人员，都在对其进行深入研究，以期将 TOD 测试技术引入相应红外成像系统评测体系当中。

5. 展望

针对目前红外成像系统检测现状，提出几点展望：

1) 目前，国内外的大多研究都是针对红外成像系统性能进行预测研究，由于红外成像系统器系统较为复杂、价格较为昂贵、应用广泛，可能会有多种多样的故障情况出现。红外系统发展多年，在使用过

程中暴露问题越来越全面,故障检修对于红外成像系统有着极大的需求,也面临着挑战。将故障问题运用统计学进行分析,对于故障较多的部分进行有针对性的研究。

2) 考虑到现在的红外系统检测主要都是处于实验室环境下,实验室环境变量因素少,测量效果相对野外也就更加精确,需要在野外环境下进行测量,找准多方面的影响因素,分析各个影响因素对于检测结果的影响,得到较为可靠的规律性结论。

3) 利用分离型建模的思路,建立从红外成像系统到人眼识别的各个部分数学模型,针对预测结果与实测结果不相符的情况进行分析改进,对于传统的测量方法进行优点归纳,并对客观测量方法进一步深入研究,更好的运用图像识别和神经网络进行测量。

4) 对现有的公式进行分析,并利用实例进行对比实验,对于现有的测量方法进行比较认证,寻找每种方法中的优点和不足,最后找出更为适合不同光学系统的测量方式。更加重视外场测试红外成像系统性能。

5) 面向三角靶标的红外成像系统测量的方式还需要有更多的改进和完善,在图像识别的过程中,可以选择有更多的实验设置来对其进行修正测量,考虑更多可能影响人眼观测红外目标的因素,对其进行更大量的反复的测试,通过更多的实验来获得更多的与人眼识别有关的特征向量数据,并将其应用于拟合模型的完善当中,更大可能地代替传统的测量技术。

6. 结束语

红外成像系统性能评价方法的研究对于红外系统的发展有着至关重要的作用。国内相对于国外研究起步较晚,研究成果也相对国外较少。面对越来越普及的红外成像系统,性能预测理论模型的建立以及故障检修方面的工作对于红外成像系统尤为重要,未来的红外成像系统性能评价方法将单项性能评价与综合性能评价有机结合、静态与动态性能模型互联互通、理论模型和实物仿真取长补短。红外成像系统性能的不断提,对于其性能评价的准确性来讲是一个极大的考验,同时也是一个红外成像整体技术迅猛发展的一个机遇。

参考文献 (References)

- [1] 石宁宁. 红外成像系统的测试与评价[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [2] 王晓蕊, 张建奇, 左月萍. 红外成像系统性能模型的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(5): 399-403.
- [3] 陈振兴. 红外成像系统 MRTD 测试技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [4] 寇小明. 红外成像观测系统性能评价方法研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [5] 金伟其, 王吉晖, 王霞, 等. 红外成像系统性能评价技术的新进展[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 7-13.
- [6] 张红坡. 红外成像系统的测试与评价[D]: [硕士学位论文]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2004.
- [7] 骆清铭, 刘贤德. 热成像系统作用距离的研究[J]. 激光与红外, 1991, 21(3): 36-39.
- [8] 高稚允. 热成像系统用于小目标探测的探测距离估算[J]. 北京理工大学学报, 1991, 11(4): 45-50.
- [9] 迟学芬, 韩昌元. 基于信息理论的采样成像系统评价方法[J]. 光学精密工程, 2003, 11(2): 207-211.
- [10] 张海涛, 赵达尊. 光电成像系统混淆效应的定量分析[J]. 光学学报, 1999, 19(12): 1649-1654.
- [11] 崔建平, 王吉晖, 金伟其, 等. 焦平面热成像系统离散采样性能评价方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 1973-1978.
- [12] 沈同圣, 张健, 娄树理. 面向目标检测的空间观测图像精确配准[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2205-2213.
- [13] 陈自宽, 翟宏琛, 母国光. 光电成像系统中的光学传递函数[J]. 光学技术, 1998(1): 57-60.
- [14] 艾克聪, 周立伟, 曾桂林, 等. 光电成像系统性能模型的研究分析[J]. 应用光学, 2003(b08): 55-60.

- [15] 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.
- [16] 童默颖, 常本康, 钱芸生, 等. 红外焦平面阵列调制传递函数研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 365-367.
- [17] 童默颖. 红外焦平面阵列 MTF 测试系统和技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [18] 王晓蕊. 红外焦平面成像系统建模及 TOD 性能表征方法研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [19] 王泽伟. 红外成像系统整机运动参数分析及测试系统研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [20] 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): 311-314.
- [21] 刘收, 杨昉, 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.
- [22] 胡铁力, 马世帮, 郭羽, 等. 热像仪空间 NETD 测量技术[J]. 应用光学, 2014, 35(6): 1094-1098.
- [23] 饶奇. 大视场红外平行光管测试系统分析软件研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2014.
- [24] 权清科, 仇振安, 崔志新. 红外成像系统噪声等效温差数字图像测试方法[J]. 电光与控制, 2013, 20(9): 102-104.
- [25] 孙文芳. 基于 MRTD 的红外成像系统性能评估和大气影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [26] 高怀平, 吴平, 张立帅. 探测条件对红外热成像系统 MRTD 影响的研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 67-71.
- [27] 田留德, 刘朝晖, 赵建科, 等. 红外成像系统 MRTD 测试方法研究[J]. 红外技术, 2015, 33(5): 368-373.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5450, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: oe@hanspub.org