

文章编号:1004-4213(2011)03-0438- 5

# Johnson 准则在红外成像系统外场 识别性能评估中的应用

吴颖霞<sup>1,2</sup>, 张建奇<sup>1</sup>, 杨红坚<sup>2</sup>, 王小兵<sup>2</sup>, 王晓蕊<sup>1</sup>

(1 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710005)

(2 中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200)

**摘 要:**通过对外场观测的红外图像进行反演, 获取了目标的临界尺寸和目标与背景的平均温差. 以热成像系统的测试最小可分辨温差曲线为基础, 确定了反演目标表观温度对应的空间频率, 并结合 Johnson 准则和目标传递概率函数建立了实测目标图像与热成像系统探测识别性能的数学模型. 该应用技术在对外场识别性能评估中避免了人员对红外靶标图像的主观判读, 可建立起客观的外场红外系统性能评估模型. 对外场实测热图像及数据进行了实验, 计算结果表明该模型可以有效地对红外成像系统的探测识别性能进行评估.

**关键词:**目标特性; Johnson 准则; 最小可分辨温差; 探测识别概率

**中图分类号:** TN219

**文献标识码:** A

**doi:** 10. 3788/gzxb20114003. 0438

## 0 引言

红外成像系统广泛应用于侦察、跟踪、预警和对抗等军事用途. 灵敏度不断提升的红外成像系统对系统探测性能评估提出了更高的要求. 在武器靶场使用红外成像系统的过程中, 需要对系统进行探测和识别性能的评估. 红外成像系统的性能评价模型主要有静态性能模型和作用距离模型. 静态模型主要有调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)、噪声等效温差 (Non-Equilibrium Temperature Difference, NETD) 和最小可探测温差 (Multi Resolution Time Domain, MRTD) 等. 而对于扩展源目标来说, 对作用距离模型主要依据 MRTD 和 Johnson 准则, 通过目标等效条带图案预测红外系统的探测、识别和分辨的能力<sup>[1-8]</sup>.

传统的外场性能预测方法是通过外场主观测试结合理论计算, 来预测不同作用距离处的探测识别概率. 在试验中, 大气环境和观察者人数都对观察结果有很大影响. 由于受到观察者心理和判断技术等主观因素的影响, 判断结果缺乏一个客观的评价标准, 外场测试结果存在较大的偏差. 同时外场预测实际是典型目标在复杂环境下进行的, 传统方法在建模上必须充分考虑大气等环境因素变化带来的影响, 使得建模有很大的局限性, 对复杂环境不能实现

准确预测. 其最为关键的一点是: 传统方法在得到目标和背景表观温差时计算非常复杂、难以精确. 首先, 要得到目标和背景的统计温差或权重温差, 统计过程实现困难且容易出现较大偏差; 其次, 在考虑大气传输衰减时, 大气消光作用、大气背景辐射、大气湍流以及气溶胶多次向前散射等效应复杂多变, 往往不能够精确建模<sup>[9]</sup>. 总之, 传统预测方法需要大量的外场试验, 还必须考虑外场大气环境、探测器的各种典型物理效应以及背景杂波对建模的影响, 计算复杂、工作量大、测量缓慢十分不利于现场性能的预测.

针对这些方法的不足, 本文提出了基于外场获取热图像的红外系统性能预测新方法: 在外场试验中, 从各种典型目标的热图像中提取目标和背景的特征, 获得目标和背景的平均灰度差, 然后利用红外成像系统的 MRTD 曲线和信号传递函数曲线, 获得目标的临界尺寸和目标与背景的平均温差, 结合 Johnson 准则预测系统的探测识别概率, 从而实现对外场探测识别性能的量化评估. 该方法可以避免传统方法中所需要的复杂建模和大量测试, 能够提高工作效率. 同时, 由于采用实测图像作为样本, 避免了在外场使用红外靶标及人员对靶标图像的主观判读, 可建立起客观的外场性能预测评估标准.

**基金项目:**航空科学基金项目 (No. 20070181005) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20070701020) 资助

**第一作者:**吴颖霞 (1962-), 女, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为武器鉴定. Email: yhj\_1979@sina.com

**导 师:**张建奇 (1960-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光电系统仿真与系统评估.

**收稿日期:** 2010-01-05; **修回日期:** 2010-02-28

# 1 基于 MRTD 和 Johnson 准则的性能评估模型

## 1.1 最小可探测温差 MRTD

红外成像系统中 MRTD 是综合评价系统温度分辨力和空间分辨力的主要参量,它不仅包括了系统特征,也包括了观察者的主观因素.基于 MRTD 的红外系统评估模型是最普及的模型,具有较好的预测效果.当目标图案的空间频率变化时,相应的可分辨温差不同,即 MRTD 是空间频率  $f$  的函数.对于低频条纹,如果具有小的 MRTD 值,表明该光学系统具有较好的灵敏度,如果高频条纹具有较小的 MRTD 值,表明该系统具有高分辨率.

目前的客观测试方法包括视频 MTF 法<sup>[10]</sup>、光度法<sup>[11]</sup>和智能神经网络测试法.客观测试 MRTD 的 MTF 法是基于从热成像系统的视频信号测量其调制传递函数、信号传递函数、噪声等效温差和噪声功率谱来确定的.MRTD 能提供一个快速同时相对简单的过程检测硬件的性能,计算公式如式(1)

$$\text{MRTD}(f) = \frac{\pi^2}{\sqrt{14}} \text{SNR}_{\text{TH}} \frac{\text{NETD}}{\text{MTF}(f)} (\tau_t \cdot \tau_h \cdot \tau_v)^{1/2} \quad (1)$$

式中  $(\tau_t \cdot \tau_h \cdot \tau_v)^{1/2}$  为眼滤波函数,取值范围 0.52~0.65;  $\text{SNR}_{\text{TH}}$  信噪比阈值,一般取 2.25;  $\text{MTF}(f)$  为红外系统传递函数,NETD 为系统噪声等效温差.测量 MRTD 的方法有主观测量法和客观测量法.

## 1.2 Johnson 准则

Johnson 准则<sup>[12]</sup>认为:在相同对比度条件下,观测者获取军事目标的能力和辨识频率随目标与背景对比度变化的测试靶标的能力是相关的.目前约翰逊准则已经广泛应用于成像系统性能评估中,是 MRTD 性能曲线和外场性能连接的桥梁.

研究者用四杆靶标来确定红外系统的最大可分辨靶标频率,相同尺寸大小内的靶标条带数目逐渐增加,直到可以分清条带.这样,就将探测概率和传感器阈值靶标样条分辨率联系起来.当目标临界尺寸为  $\sqrt{A}$  时,在目标的临界尺寸方向上最大可分辨的周期数根据不同的识别任务而不同,由式(2)决定

$$N = \sqrt{A} \cdot f_T \quad (2)$$

式中,  $N$  是目标临界尺寸方向可识别的目标周期数,  $f_T$  是可分辨的靶标样条的最大基频,单位为  $\text{c/mrad}$ .根据约翰逊准则,目标临界尺寸方向可识别的周期数:探测为 1,识别为 4,辨认为 6.4.50% 概率下的条带周期数为  $N_{50}$ ,对应概率  $P$  的条带周期数  $N$  满足

$$P = \left( \frac{N/N_{50}}{1 + N/N_{50}} \right)^E, \quad N = 2.7 + 0.7(N/N_{50}) \quad (3)$$

基于式(3)建立任务传递概率函数.

## 1.3 基于 Johnson 准则的外场性能评估

红外成像系统外场探测性能评估模型的思路基本相同:以红外成像系统的 MRTD 或系统对比度阈值函数(Critical To Function, CTF)模型为基础,建立系统调制传递函数 MTF 和噪声等效温差 NETD 的联系.利用 MRTD 曲线或 CTF,根据 Johnson 准则或目标任务性能准则,建立场景的目标特征和系统的性能参量 MRTD 的关系,计算角空间频率对应的靶标条带数,最后利用概率传递函数预测不同距离处的探测识别概率.

这些预测模型将系统探测识别性能与等效条带图案联系起来,实现对红外系统的探测、识别和分辨性能进行预测.由于外场实际目标形状复杂,Johnson 准则无法直接应用于外场试验中红外系统的性能量化评估.因此需要确定被测目标和等效条带图案之间的关系,在此基础上将 Johnson 准则和外场测试目标的目标特性联系起来,进行热成像系统探测识别性能量化评估.

根据 Johnson 准则,热成像系统获取目标的能力和在同样温差下分清频率随目标背景温差变化的等效条带图案是相关的.由此可知,等效条带的参量为等效条带的空间频率(临界尺寸)和目标(条带)与背景的平均温差.因此可以对热成像系统野外测试获得的目标热像图进行目标特性分析,获得目标的临界尺寸和目标与背景的平均温差.在与外场目标目标特性相同的等效条带图案基础上,使用 Johnson 准则对系统探测识别性能进行量化评估.

## 2 外场红外图像的识别性能评估

为评估红外成像系统在外场条件下探测、识别和辨认目标的性能,可以先在室内获取系统的温度响应曲线,再结合外场实测图像,以 MRTD 曲线和 Johnson 准则为依据实现.其具体实现步骤为:

1) 使用标准黑体标校热像仪热像图电平值与黑体温度之间的关系.

标定模型为

$$S^{\text{Measured}}(\sigma) = Q(\sigma) [L^{\text{Source}}(\sigma) + M^{\text{Stray}}(\sigma)]^2 + K(\sigma) [L^{\text{Source}}(\sigma) + M^{\text{Stray}}(\sigma)] \quad (4)$$

$$L = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (5)$$

式中,  $S^{\text{Measured}}$  为测量灰度值,  $K$  为系统线性响应函数,  $L^{\text{Source}}$  为目标的谱辐射亮度,  $M^{\text{Stray}}$  为系统亮度偏差,  $Q$  为系统非线性响应系数,  $C_1$  为第一辐射常数,

$C_2$  为第二辐射常数.

操作时可将标准黑体设置一个温度值  $T$ , 记录热像仪相应输出的电平值  $S^{\text{Measured}}$ . 通过多点测量, 拟合得到热像仪电平和黑体温度值的关系曲线. 该曲线可以用于反演得到被测目标的表观温度值.

2) 获取外场红外图像, 根据热像仪电平和黑体温度值关系曲线计算到目标和背景的表观温差  $\Delta T_{\text{apparent}}$ .

3) 分析影响红外成像系统性能的各类因素, 使用不同空间频率进行成像. 对得到的红外图像进行处理, 根据图像特征参量进行识别, 获取热成像系统的 MRTD 曲线.

4) 根据  $\Delta T_{\text{apparent}}$  值和 MRTD 曲线求解目标表观温差对应的角空间频率  $f$ .

$$\Delta T_{\text{apparent}} = \text{MRTD}(f) \quad (6)$$

5) 计算目标临界尺寸所对应的最大可分辨周期数  $N$ .

6) 利用 Johnson 准则和目标传递概率函数, 求取目标的探测识别概率, 对系统探测识别性能给出结论.

### 3 仿真模拟

使用上述方法对 3 km 远处的坦克进行仿真模拟, 计算该距离处不同方向坦克识别和辨认概率. 仿真中使用的热像仪参量为: 波长  $8 \sim 10 \mu\text{m}$ , NETD30 mk, 焦距 100 mm; 气象参量: 温度  $24.0^\circ\text{C}$ , 湿度 20%, 风速 1.8 m/s.

仿真步骤为:

1) 标定热像仪灰度温度曲线

在室内利用黑体进行标定, 结果如图 1. 该曲线反映了热像仪的输出电压与表观温度的关系曲线, 这为采集图像中目标温差估算提供了标准数据模型.

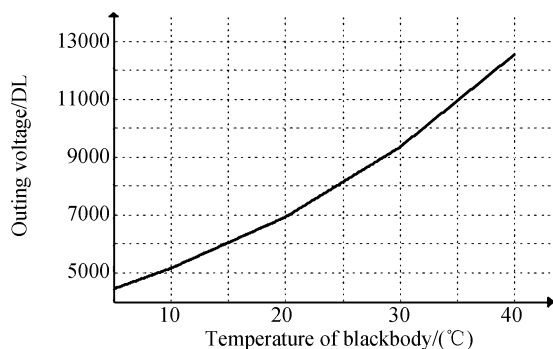


图 1 热像仪电平和黑体温度关系图

Fig. 1 Relationship of voltage of thermal imager with temperature of blackbody

2) 外场获取不同方向的红外热像图

以坦克侧面为角度起始位置, 分别在  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、

$30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  的不同观测方向, 获取红外图像. 对获取的图像进行处理, 完成目标轮廓跟踪后对目标和背景电平值进行统计, 其差值结果如表 1 所示. 图 2 (a) 是热像仪在  $45^\circ$  观测方向上、3 km 处获取的坦克热像图, 图 2 (b) 为对应地进行目标轮廓跟踪的结果.

表 1 坦克目标与背景电平差 (DL)  
Table 1 Difference voltage level between target and background (DL)

Angular direction/(°)	0	15	30	45	90
Difference voltage level between target and background/DL	556	470	645	905	381

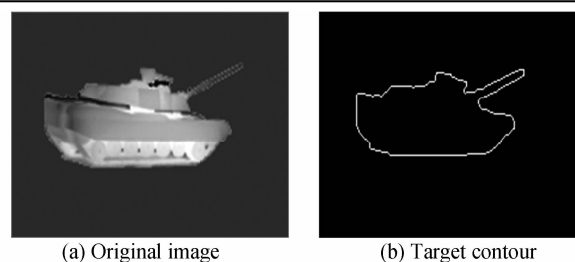


图 2 目标轮廓跟踪示意图

Fig. 2 Target contour segment

3) 计算目标处表观温差  $\Delta T_{\text{apparent}}$

根据不同角度获取图像的处理结果, 计算 3 km 处坦克和背景表观温度差  $\Delta T_{\text{apparent}}$ , 结果如表 2.

表 2 坦克表观平均温度与背景平均温度差  $\Delta T_{\text{apparent}}$

Table 2 The difference of average temperature between the tank apparent and background  $\Delta T_{\text{apparent}}$

Angular direction/(°)	0	15	30	45	90
The difference of average temperature $\Delta T_{\text{apparent}}/(^\circ\text{C})$	1.56	1.32	1.81	2.54	1.07

4) 获得热像仪的 MRTD 曲线

使用图像识别法测得热像仪的 MRTD 曲线如图 3.

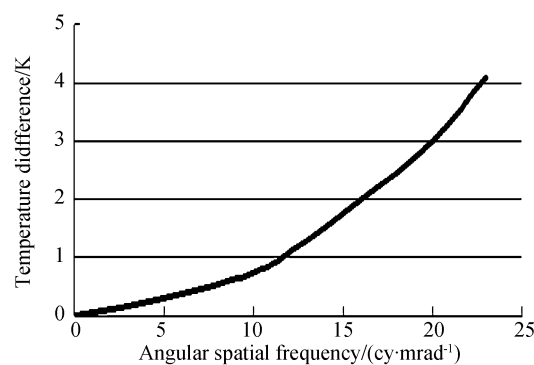


图 3 MRTD 曲线图

Fig. 3 MRTD curve

5) 计算角空间频率  $f$

根据表 1 中的表观温差和图 3 中的 MRTD 曲线, 可以获得目标表观温差对应的角空间频率  $f$ .

表 3 目标表观温差对应的角空间频率  $f$

Table 3 The corresponding angular spatial frequency of the different apparent temperature  $f$

Angular direction/(°)	0	15	30	45	90
-----------------------	---	----	----	----	----

Angular spatial frequency	14	13	15	18.5	10.5
---------------------------	----	----	----	------	------

6) 计算坦克在不同方向的临界尺寸

坦克在 3 km 不同方向的临界尺寸  $\sqrt{A}$ , 如表 4.

表 4 坦克在 3 km 不同方向的临界尺寸

Table 4 The Critical dimension of the tank at 3 km in different direction

Angular direction/(°)	0	15	30	45	90
Critical dimension/(mrad)	1.26	1.15	1.141	0.72	0.93

5) 计算各向异性周期数

根据式(2)可得到坦克在 3 km 处识别和辨认的各向异性周期数, 结果如表 5.

表 5 3 km 处识别和辨认的各向周期数

Table 5 Identified and recognized cycle number at 3 km in different direction

Angular direction/(°)	0	15	30	45	90
Identified cycle number	3.7	3.85	3.8	3.75	4
Recognized cycle number	7	8	7.3	7.2	10

坦克在各个方向各向异性周期数极坐标图如图 4.

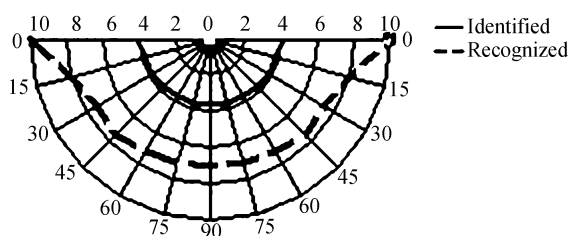


图 4 坦克识别辨认各向异性周期数

Fig. 4 Inhomogeneous cycle number of tank recognition

6) 计算目标的探测识别概率

根据公式(3)可计算坦克各个方向的探测、识别和辨认概率, 结果如表 6.

表 6 3 km 处探测、识别和辨认概率

Table 6 The probability of detecting, identifying and recognizing the target

Angular direction/(°)	0	15	30	45	90
Detecting probability	100%	100%	100%	100%	100%
Identifying probability	88%	79%	87%	70%	44%
Recognizing probability	36%	25%	34%	19%	9%

从表中可以看出: 在 3 km 距离处, 该红外系统可以从任意方向探测到坦克; 侧面的识别概率是迎头时的两倍, 说明侧面更容易识别目标; 侧面的辨认概率是迎头时的 4 倍, 说明侧面更容易辨认目标.

## 4 结论

通过本文的论述可以得到: 1) Johnson 准则论述了热成像系统探测识别能力与等效条带靶之间的关系, 对实验室内预测有指导意义, 但是没有论述如何在实际试验中量化评估热成像系统的探测识别性能; 本文将外场测试目标的目标特征和 Johnson 准则结合使用, 解决了野外测试评估结果受观察者主观影响、观察者人数与试验大气环境稳定性矛盾这

些问题, 使得评估结果客观稳定. 2) 目标临界尺寸对识别和辨认所要求的分辨率有很大的影响. 迎头识别和辨认目标比侧面困难, 原因在于迎头观测目标时, 相对来说缺少独特的特征; 然而从侧面观测时, 坦克的身管和炮塔等独特的特征就显现出来了, 这使得目标更易识别和辨认. 因此, 在进行热成像系统探测识别试验时, 需要考虑观察目标的方向性. 3) 本文使用了与实测目标两项特征参量(临界尺寸和目标与背景的平均温差), 在相同的等效条带图案模拟目标, 进行外场的热成像系统探测识别性能量化评估. 实际的目标特性远比这两个参量丰富, 在以后的研究中, 将建立与实际目标特性更加相似的模型, 用于外场热成像系统的探测识别性能评估.

## 参考文献

- [1] HIXSON J G, TEANEY B, JACOBS E L. Modeling the effects of image contrast on thermal target acquisition performance [C]. *SPIE*, 2006, **6207**: 62070H-1.
- [2] HIXSON J G, JACOBS E L, VOLLMERHAUSEN R H. Target detection cycle criteria when using the targeting task performance metric [C]. *SPIE*, 2004, **5612**: 275-283.
- [3] VOLLMERHAUSEN R H, DRIGGERS R G, WILSON D L. Predicting range performance of sampled imagers by treating aliased signal as target-dependent noise [J]. *JOSA A*, 2008, **25** (8): 2055-2065.
- [4] van HODGKIN A, DRIGGERS R G, O'SHEA P. Comparison of emissive and reflective minimum resolvable temperature difference for measurements of sensor performance [C]. *SPIE*, 2003, **5076**: 190-195.
- [5] BIJL P, HOGERVORST M A, VALETON J M. TOD, NVTherm and TRM3 model calculations: a comparison [C]. *SPIE*, 2002, **4719**: 51-62.
- [6] BIJL P, VALETON J M. TOD, the Alternative to MRTD and MRC [J]. *Optical Engineering*, 1998, **37**(7): 1984-1994.
- [7] ZHANG Jian-qi, WANG Xiao-rui, HU Fang-ming. TOD performance theoretical model for scanning infrared imagers [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, **48**(1): 32-38.
- [8] BAI Jun-qi, CHEN Qian. Infrared microscanning imaging technique based on locally gradient feature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2253-2256.  
白俊奇, 陈钱. 基于局部梯度特征的红外微扫描成像技术研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2253-2256.
- [9] HAN Yu-ge, XUAN Yi-min. Effect of atmospheric transmission on IR radiation feature of target and background [J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, **23**(6): 8-11.  
韩玉阁, 宣益民. 大气传输特性对目标与背景红外辐射特性的影响 [J]. *应用光学*, 2002, **23**(6): 8-11.
- [10] ZHANG Zheng-hui, WU Xiao-qing, XU Shi-wen. Calculation the relationship between MTF and MRTD in FLIR [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S2): 23-26.  
张正辉, 吴晓靖, 许士文. 前视红外成像 MTF 与 MRTD 关系的计算 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(S2): 23-26.
- [11] HUANG Feng, WANG Yue-feng, DONG Wei. Study on infrared camouflage effect evaluation based on gray correlation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 928-931.  
黄峰, 汪岳峰, 董伟. 基于灰度相关的红外隐身效果评价方法研究 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(6): 928-931.
- [12] JIN Wei-qi, WANG Ji-hui, WANG Xia, et al. Development on performance evaluation of thermal imaging systems [J].

*Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 7-13.  
金其伟, 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.

## Application of Johnson Criteria in Evaluating Field Detection and Recognition Probability of IR System

WU Ying-xia<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian-qi<sup>1</sup>, YANG Hong-jian<sup>2</sup>, WANG Xiao-bing<sup>2</sup>, WANG Xiao-rui<sup>1</sup>

(1 *School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 7100071, China*)

(2 *Huayin Weapon Testing Center of China, Huayin, Shaanxi 714200, China*)

**Abstract:** The apparent average temperature difference and critical dimension of actual target and background were acquired through retrieving infrared target image. The retrieved apparent temperature difference and the measured MRTD curve were combined to determine the corresponding spacial frequency. And, a quantitative relationship between the target infrared image and the probability of detection and recognition was established with Johnson criteria and target transfer probability function (TTPF). The method avoids operator's subjective judging, so the result is more impersonal. This method was experimentally validated in evaluating the detection and recognition probability of IR system.

**Key words:** Target characteristic; Johnson criteria; Multi Resolution Time Domain (MRTD); Tetection and recognition probability