

文章编号:1001-9014(2006)02-0118-05

三角形方向鉴别阈值性能理论模型研究

王晓蕊^{1,2}, 张建奇¹, 冯卓祥², 常洪花¹

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:阐述了红外成像传感器性能表征的 TODT 度量方法;依据频谱理论,首先确定了三角形标准靶的空间频谱描述函数;利用匹配滤波器的概念分别推导了人眼/大脑系统通过红外成像传感器可感知的非周期三角形标准靶信号和噪声;以图像视觉感知信噪比为理论基础,首次建立了红外成像传感器的 TODT 性能模型,并给出了计算机仿真结果.与实验测量数据比较显示了此模型预测红外成像传感器 TODT 度量曲线的合理性.

关键词:红外成像传感器;三角形标准靶;三角形方位鉴别阈值;匹配滤波器;三维噪声模型

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

THEORETICAL MODEL ON THE PERFORMANCE OF TRIANGLE ORIENTATION DISCRIMINATION THRESHOLD

WANG Xiao-Rui^{1,2}, ZHANG Jian-Qi¹, FENG Zhuo-Xiang², CHANG Hong-Hua¹

(1. Institute of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Xi'an institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: TODT measurement method for characterizing the performance of infrared imaging sensor was introduced briefly. According to the spectrum theory, the spatial spectrum distribution of standard triangle pattern was determined quantitatively. The matched filter concept was adopted to derive the perceived triangle pattern signal and overall noise by the human visual system through infrared imaging system, respectively. On the basis of the perceived signal-to-noise ratio, the TOD performance theoretical model was first determined, and the simulated results was given. Experimental results show that this model can give reasonable prediction of the TOD performance curve for the infrared imaging system.

Key words: infrared imaging sensor; triangle standard pattern; triangle orientation discrimination threshold; matched filter; three-dimensional noise model

引言

荷兰 TNO 人类因素研究所的 P. Bijl 等人,于 1998 年提出了一种能充分表征红外成像系统性能且易使用的新方法:三角形方向鉴别阈值法(Triangle Orientation Discrimination threshold),简称 TODT 或 TOD 法^[1-3].该方法是以前等边三角形标准靶标,更好地定义观察者任务和一种纯粹的精神心理测量程序为基础,具有较强的理论基础和实验应用的优点.适用于不同类型(如扫描型,凝视型)红外成像系统性能度量,且它能弥补最小可分辨温差(MRTD)表征红外成像系统的很多不足^[4-6].

TODT 度量方法自提出之日,即获得红外成像

评价领域的广泛关注,多次试验显示此方法在凝视成像系统综合性能评价和现场性能预测方面具有明显的优越性.但主要研究工作集中在 TODT 方法的试验测试和验证方面^[7].与标准四杆靶标不同,三角形靶标的描述函数不能进行水平变量和垂直变量分离,使得 TODT 传感器性能理论模型的研究一直没能突破.这将导致 TODT 度量方法在红外成像传感器的方案论证、优化设计及技术指标确定等方面的使用受到限制.基于此,本文针对红外成像特性,首次推导了 TODT 传感器性能理论模型,经过实验验证,显示此模型能够合理地预测系统的性能.这将为 TODT 度量方法成为红外成像系统的新度量标准、系统的端到端匹配设计和现场性能预测提供理

收稿日期:2005-03-11,修回日期:2005-09-19

Received date: 2005-03-11, revised date: 2005-09-19

基金项目:国家自然科学基金(60277005,60477038)、博士学科点基金(20030701003)和武器装备预研基金(51403030905HK6001)资助项目

作者简介:王晓蕊(1976-),男,山东金乡人,博士研究生,主要从事光电成像系统性能评估、系统设计及实时图像处理等研究.

论基础.

1 TODT 度量标准

TODT 法是近年提出的一种度量红外成像系统性能的新方法^[1],其原理是利用不同尺寸的等边三角形靶标作为测试样条,通过红外成像系统,由人眼视觉系统观察不同对比度三角形靶的方向(上、下、左、右),鉴别三角形方位,统计三角形方位正确判断的概率,并利用心理测量函数-Weibull 函数[3,4]拟合不同正确判断概率实验数据,通过插值得到 75% 正确响应概率对应的阈值对比度,改变三角形靶标尺寸,重复上述过程,就得到类似 MRTD 曲线的三角形方向可鉴别阈值对比度与三角形尺寸之间的关系曲线,如图 1 所示.

2 TODT 性能模型推导

由度量标准可知,TODT 曲线与三角形靶标、成像系统和观察者视觉系统有关.因此,本文在 TODT 性能模型推导的过程中,把三者作为整体考虑,以图像视觉信噪比为理论基础,把三角形标准靶空间分布特性、系统调制模糊效应、系统传感器总噪声及视觉系统对信号、传感器噪声的空间传递、空时域积分效应联系起来,综合考虑了各因素对系统性能的影响.并假设人眼感觉到的图像信噪比大于或等于视觉阈值信噪比时,实现三角形方向鉴别,此时对应的等边三角形标准靶与背景的温差为三角形方向鉴别阈值温差.

2.1 三角形标准靶空间分布数学描述

三角形标准靶空间分布函数的确定是推导 TODT 性能理论模型的前提条件.由于成像系统的建模通常采用线性系统理论,为了推导计算的方便,本文计算了三角形标准靶的傅里叶频谱.假设等边三角形标准靶的边长为 w ,与背景的温差为单位振幅,其空间分布在原点位于三角形中心点的笛卡儿

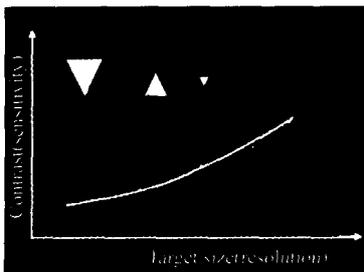


图 1 TODT 测量曲线
Fig. 1 TODT measuring curve

坐标系中,如图 2 所示.

其数学函数可表示为

$$o(x,y) = \begin{cases} 1 & \left\{ \begin{array}{l} -\frac{w}{2} \leq x \leq 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{6}w \leq y \leq \sqrt{3}x + \frac{\sqrt{3}}{3}w \end{array} \right\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq \frac{w}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{6}w \leq y \leq -\sqrt{3}x + \frac{\sqrt{3}}{3}w \end{array} \right\}. \quad (1)$$

对式(1)作傅里叶变换,可得到三角形标准靶的空间频谱

$$O(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x,y) \exp(-j2\pi(x\xi + y\eta)) dx dy. \quad (2)$$

由于红外成像系统是非相干成像系统,其相位频谱对输出图像的贡献较小;为了简化计算,只考虑目标的强度频谱,即式(2)空间频谱的模为

$$|O(\xi, \eta)| = \frac{\sqrt{9\eta^4 \sin^2 w\pi\xi + 3\xi^2 \eta^2 \cos^2 w\pi\xi + 3\xi^2 \eta^2 - 6\sqrt{3}\xi^3 \eta \sin w\pi\xi \sin(\sqrt{3}w\pi\eta) - 6\xi^2 \eta^2 \cos w\pi\xi \cos(\sqrt{3}w\pi\eta)}}{2\pi^2 \xi \eta (3\eta^2 - \xi^2)}. \quad (3)$$

计算了标准靶的空间频谱分布后,就可以推导其经过红外成像系统的输出信号.

2.2 视觉感知信号推导

红外成像系统对三角形标准靶的调制效应包括系统的增益、各模块滤波效应.为了描述三角形标准靶的空间传递特性,我们假设红外成像系统为线性系统,利用调制传递函数描述系统各组成模块对三角形标准靶的调制.同时考虑到系统的增益 G ,那么温差为 ΔT 的三角形标准靶,在显示单元单帧图像内的单位面积信号空间谱分布可表示为

$$M(\xi, \eta) = \frac{G\Delta T O(\xi, \eta) H_{sys}(\xi, \eta)}{\Delta x \Delta y}, \quad (4)$$

式(4)中 $H_{sys}(\xi, \eta)$ 为红外成像系统二维调制传递函数(从光学系统到监视器),在文献[8]中已经给

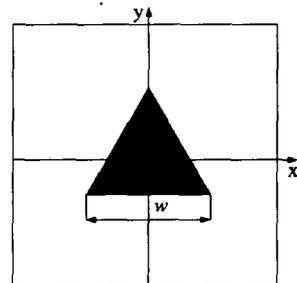


图 2 三角形标准靶的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of triangle standard bar

出; Δy 表示垂直采样间距, Δx 表示水平等效采样间距, 对于凝视型红外系统 Δx 表示探测器间隔宽度, 对于扫描型系统, Δx 表示水平扫描带宽。

视觉系统对目标信号特性的影响是多方面的, 它们不仅仅是像处理链节中的另一个 MTF. 时间与空间积分的叠加和关于人如何完成探测的假设是任何静态性能模型的基本方面. 对于人眼的空间调制效应, 我们采用了 NVTherm 模型使用的眼睛传递模型 $H_{eye}(\xi, \eta)$ ^[8], 考虑了瞳孔尺寸随环境亮度的变化; 对于人眼对信号的空间积分特性, 本文采用了匹配滤波器加以表征. 即它与通过成像器之后的目标像匹配, 心理测量试验显示, 人眼的空间积分范围限制在几 mrad 内, 通常选择 4mrad 的限制^[9]. 为此, 眼睛的空间匹配滤波器 $H_{mat}(\xi, \eta)$ 表示为

$$H_{mat}(\xi, \eta) = \begin{cases} O(\xi, \eta)H_{sys}(\xi, \eta)H_{eye}(\xi, \eta), & w \leq 4mrad \\ O(\xi, \eta)H_{sys}(\xi, \eta)H_{eye}(\xi, \eta) / \cdot w = 4mrad, & w > 4mrad \end{cases} \quad (5)$$

人眼的时间积分特性则表示在人眼的积分时间 t_{eye} 内从光电显示器上积分了帧信息. 令成像系统的帧频为 F , 则人眼积分时间内的帧信息叠加后的单位面积信号能量表示为

$$M(\xi, \eta) = \frac{G\Delta T O(\xi, \eta)H_{sys}(\xi, \eta)H_{eye}(\xi, \eta)H_{mat}(\xi, \eta)}{\Delta x \Delta y} (F, T_{eye}). \quad (6)$$

求得人眼响应的目标空间频谱分布后, 即可得到人眼响应的峰值信号能量

$$\begin{aligned} (\text{Signal})_p &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M(\xi, \eta) d\xi d\eta \\ &= \frac{G\Delta T (F, t_{eye})}{\Delta x \Delta y} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta)H_{sys}(\xi, \eta)H_{eye}(\xi, \eta)H_{mat}(\xi, \eta) d\xi d\eta. \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 视觉感知噪声推导

本文所讨论的噪声为视觉感知的噪声量, 探测器噪声功率经系统在前置放大器之后的所有元件 (包括显示器和人眼) 的滤波, 然后与匹配滤波作卷积, 得到单帧噪声功率谱. 此匹配滤波器仍与退化的目标图像相匹配. 噪声功率谱在整个频率范围积分, 得到噪声方差, 然后再乘以视觉响应时间内的帧数. 这个量的平方根在 TODT 公式中用作信号与均方根 (rms) 噪声比值的噪声. 即眼睛感知噪声受限于如下因素: 监视器和人眼空间调制效应对噪声的滤波、人眼的时间积分特性和空间积分特性。

为了表征噪声在红外成像系统/视觉系统中的传递特性, 本文采用了三维噪声模型^[10]和视觉匹配滤波器的概念相结合的方法. 三维噪声模型把成像

系统的噪声分为 7 个分量 $\sigma_{twh}, \sigma_{vh}, \sigma_{th}, \sigma_{tw}, \sigma_h, \sigma_v, \sigma_t$. 要计算三维噪声分量, 首先计算系统的空域噪声份量 σ_{twh}

$$\sigma_{twh} = \frac{4F^2 \sqrt{\Delta f_p}}{\sqrt{A_d n_s \tau_0 \pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda}. \quad (8)$$

式中 Δf_p 为探测器信号读出电路的噪声等效带宽, F 为系统光圈数, A_d 为探测器面积, τ_0 为光学系统透过率, n_s 为探测器串扫元数, $D^*(\lambda)$ 为光谱探测率, $W(T_B)$ 为温度为 T_B 的背景辐射出射度的积分. 其他噪声份量可以参照美国 NVESD FLIR92 模型提供的其与 σ_{twh} 之间的比例缺省值给出^[11].

但是要得到眼睛感知的各噪声分量信号, 就要考虑眼睛的时间积分效应和空间积分效应对 $\sigma_{twh}, \sigma_{vh}, \sigma_{th}, \sigma_{tw}, \sigma_h, \sigma_v, \sigma_t$ 的修正. 由于眼睛匹配滤波器与退化的三角形标准靶图像有关, 不能作水平和垂直变量分离. 为了计算方便, 本文把三角形标准靶等效为同样面积的矩形窗, 进行水平和垂直分量分离. 其对应的水平和垂直匹配滤波器分别为

$$H_{math}(\xi) = O(\xi)H_{sys}(\xi)H_{eye}(\xi), \quad (9)$$

$$H_{matv}(\eta) = O(\eta)H_{sys}(\eta)H_{eye}(\eta), \quad (10)$$

式中 $O(\xi)$ 和 $O(\eta)$ 分别表示三角形标准靶等效矩形的水平和垂直频谱, $H_{sys}(\xi)$ 和 $H_{sys}(\eta)$ 分别表示红外成像系统的水平和垂直传递函数 (从光学系统到监视器), $H_{eye}(\xi)$ 和 $H_{eye}(\eta)$ 分别表示眼睛的水平和垂直传递函数. 已知输出单元探测器的水平和垂直噪声带宽分别为

$$\Delta f_x' = \frac{1}{\Delta x'}, \quad \Delta f_y' = \frac{1}{\Delta y'}, \quad (11)$$

式中 $\Delta x', \Delta y'$ 分别表示探测器水平尺寸和垂直尺寸, 则经过眼睛/大脑的调制传递、水平方向和垂直方向空间积分后, 水平方向和垂直方向噪声带宽分别为

$$\Delta f_x = \frac{\Delta x}{\Delta x'} \int_{-\infty}^{\infty} MTF_{post}^2(\xi) H_{math}^2(\xi) d\xi, \quad (12)$$

$$\Delta f_y = \frac{\Delta y}{\Delta y'} \int_{-\infty}^{\infty} MTF_{post}^2(\eta) H_{matv}^2(\eta) d\eta, \quad (13)$$

因此, 三维噪声分量 $\sigma_{twh}, \sigma_{vh}, \sigma_{th}, \sigma_{tw}, \sigma_h, \sigma_v, \sigma_t$ 经眼睛空间积分修正后分别变为

$$\begin{aligned} \sigma_{twh} \sqrt{\Delta f_y / \Delta f_y'} \sqrt{\Delta f_x / \Delta f_x'}, & \quad \sigma_{vh} \sqrt{\Delta f_y / \Delta f_y'} \sqrt{\Delta f_x / \Delta f_x'}, \\ \sigma_{th} \sqrt{\Delta f_x / \Delta f_x'}, & \quad \sigma_{tw} \sqrt{\Delta f_y / \Delta f_y'}, \quad \sigma_h \sqrt{\Delta f_x / \Delta f_x'}, \\ \sigma_v \sqrt{\Delta f_y / \Delta f_y'}. & \end{aligned} \quad (14)$$

同理, 加上眼睛/大脑的时间积分效应对各噪声分量的累加效应, 并令 $E_t = F, t_{eye}, E_v = \Delta f_y / \Delta f_y', E_h =$

$\Delta f_x/\Delta f_x'$, 则视觉系统感知的各噪声分量分别变为

$$\begin{aligned} \sigma_{twh}^2 &\rightarrow \sigma_{twh}^2 E_t E_v E_h, \quad \sigma_{vh}^2 \rightarrow \sigma_{vh}^2 E_v E_h, \\ \sigma_{tw}^2 &\rightarrow \sigma_{tw}^2 E_t E_v, \quad \sigma_{th}^2 \rightarrow \sigma_{th}^2 E_t E_h, \\ \sigma_v^2 &\rightarrow \sigma_v^2 E_v, \quad \sigma_h^2 \rightarrow \sigma_h^2 E_h, \quad \sigma_t^2 \rightarrow \sigma_t^2 E_t. \end{aligned} \quad (15)$$

根据各噪声份量的独立性, 则眼睛感知的系统输出总噪声为

$$\sigma_{sys} = \sqrt{\sigma_{twh}^2 E_t E_v E_h + \sigma_{vh}^2 E_v E_h + \sigma_{tw}^2 E_t E_v + \sigma_{th}^2 E_t E_h + \sigma_v^2 E_v + \sigma_h^2 E_h + \sigma_t^2 E_t}. \quad (16)$$

E_t, E_v, E_h 分别描述了视觉系统的时间积分、垂直方向空间积分和水平方向空间积分引起的各坐标轴噪声带宽修正. 考虑到系统的增益 G , 则人眼感知的单位显示器面积的噪声信号为

$$\sigma_{np} = \left[\frac{G^2 \sigma_{sys}^2}{\Delta x \Delta y} \right]^{1/2}. \quad (17)$$

2.4 TOD 性能理论模型

结合前两节推导的视觉感知信号和噪声, 视觉系统通过凝视红外成像系统观察三角形标准靶的感知信噪比定义为

$$\begin{aligned} SNR_p &= \frac{(Signal)_p}{\sigma_{np}} = \frac{\frac{G \Delta T (F_{t,eye})}{(\Delta x \Delta y)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta) H_{sys}(\xi, \eta) H_{eye}(\xi, \eta) H_{mat}(\xi, \eta) d\xi d\eta}{G \sqrt{\sigma_{twh}^2 E_t E_v E_h + \sigma_{vh}^2 E_v E_h + \sigma_{tw}^2 E_t E_v + \sigma_{th}^2 E_t E_h + \sigma_v^2 E_v + \sigma_h^2 E_h + \sigma_t^2 E_t} (\Delta x \Delta y)^{1/2}}. \end{aligned} \quad (18)$$

假设视觉信噪比刚好大于阈值视觉信噪比时, 人眼刚好能辨别鉴别三角形样条的方位, 即此时对应的目标温差为三角形可鉴别阈值温差 TODT, 对上式进行简化可得:

$$\begin{aligned} TODT &= \frac{SNR_{th} (\Delta x \Delta y)^{1/2} \sqrt{\sigma_{twh}^2 E_t E_v E_h + \sigma_{vh}^2 E_v E_h + \sigma_{tw}^2 E_t E_v + \sigma_{th}^2 E_t E_h + \sigma_v^2 E_v + \sigma_h^2 E_h + \sigma_t^2 E_t}}{(E_t) \left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta) H_{sys}(\xi, \eta) H_{eye}(\xi, \eta) H_{mat}(\xi, \eta) d\xi d\eta \right)}, \end{aligned} \quad (19)$$

式中 TODT 为三角形靶标尺寸的函数.

3 仿真结果验证与分析

针对 2 种典型红外成像系统(凝视型和扫描型)的参数, 如表 1 和表 2 所列, 假设视觉阈值信噪比为 2.8, 利用推导的 TODT 理论模型计算得到系统的 TODT 曲线, 分别如图 3 和图 4 ‘星号’ 标记的曲线所示, 纵坐标表示三角形鉴别阈值, 横坐标表示三角形尺寸的倒数(等效为空间频率).

为了验证此理论模型的正确性, 本文设计制作了几种不同尺寸的等边三角形靶标, 针对 2 种类型

表 1 凝视成像系统的基本参量

Table 1 Fundamental parameters of staring imaging system for TOD calculation

Basic parameter of sensor	320 × 240 Staring
Detector Pitch	30 micron
Detector size	25 micron
Field-of-View	4° × 3°
Optics Focal Length	138mm
f-number	2
Frame Frequency	50Hz
D*	1 × 10 ¹¹ cm (Hz) ^{1/2} /Watt

表 2 凝视成像系统的基本参量

Table 2 Fundamental parameters of staring imaging system for TOD calculation

Basic parameter of sensor	288 × 4 Staring
Detector Pitch	25 micron
Detector size	18 micron
Field-of-View	4° × 3°
Optics Focal Length	250mm
f-number	2.4
Frame Frequency	30Hz
D*	8 × 10 ¹⁰ cm (Hz) ^{1/2} /Watt

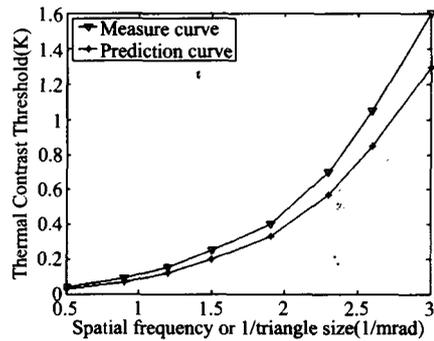


图 3 TODT 测量与理论预测曲线(凝视型)
Fig. 3 TODT measuring and prediction curve for staring infrared imaging system

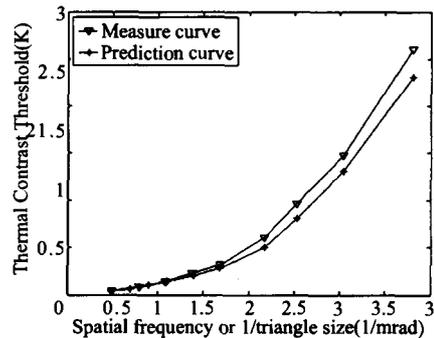


图 4 TODT 测量与理论预测曲线(扫描型)
Fig. 4 TODT measuring and prediction curve for scanning infrared imaging system

成像系统,在现有的 MRTD 测试设备上替换标准靶标,实现了 TODT 曲线的实际测量,分别如图 3 和图 4 中‘下三角形’标记的曲线所示.从图 3 和图 4 可以看出:TODT 预测曲线的变化总趋势与大家所熟悉的 MRTD 曲线有一定的相似性:随着空间频率的增加,TODT 值逐渐增加.对于凝视型成像系统,TODT 理论计算曲线与实际测量曲线相比,不同空间频率的相对误差在 20% ~ 30% 范围,低空间频率处误差相对较小,而在高空间频率处相对误差较大.对于扫描型红外成像系统,TODT 理论计算曲线与测量曲线的误差相对较小为 10% ~ 20% 范围.可以看出扫描型成像系统的 TODT 预测值要比凝视型成像系统的 TODT 值更精确.其主要原因:凝视成像系统欠采样引起的频谱混淆没有在 TODT 理论模型中给予体现,而高频处的频谱混淆又往往比较明显,导致高频处出现较大的 TODT 预测误差.考虑到红外成像系统引入的各种复杂效应,此模型预测的 TODT 值是可以接受的.尽管要使建立的 TODT 理论模型成为光电成像领域接受的新标准,仍需对 TODT 理论模型进行更多的试验验证和模型修正,但初步试验结果已经显示了该理论模型的合理性.

4 结论

以图像视觉感知信噪比为理论基础,并利用匹配滤波器的思想定量描述了人眼/大脑对红外成像系统输出靶标图像和噪声的空间积分效应和时间积分效应,首次推导了红外成像传感器的 TODT 性能理论模型;并针对两种类型(扫描型和凝视型)的红外成像系统物理参数,分别给出了 TODT 仿真计算曲线,且利用试验测量数据验证了此 TODT 性能模型的合理性.尽管需要更多的测试和验证,初步试验结果显示:此性能模型能发展成为一种能预测各种类型成像系统性能模型,为 TOD 成为红外成像系

统的新度量标准奠定理论基础.

REFERENCES

- [1] Bijl P, Valetton J M. TOD, the alternative to MRTD and MRC [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(7):1976—1983.
- [2] Bijl P, Valetton J M. Validation of the new triangle orientation discrimination method and ACQUIRE model prediction using observer performance data for the ship target [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(7):1984—1994.
- [3] Bijl Piet, Valetton J Mathieu, Arie N de Jong. TOD predicts target acquisition performance and scanning thermal imager [J]. *Proc. SPIE*, 2000, **4030**:96—103.
- [4] WANG Xiao-Rui, ZHANG Jian-Qi. Machine vision based IR imaging system detection performance evaluation[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王晓蕊,张建奇.基于机器视觉的红外成像系统探测性能评估. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(4):273—276.
- [5] Joseph Kostrzewa, John Long, John Graff, et al. TOD versus MRT when evaluating thermal imagers that exhibit dynamic performance [J]. *Proc. SPIE*, 2003, **5076**: 220—232.
- [6] Bijl P, Hogervorst Maarten A, Valetton J Mathieu. TOD, NVTherm and TRMD model calculation; a comparison[J]. *Proc. SPIE*, 2002, **4719**:51—62.
- [7] Holst Gerald C. *Electro-Optical Imaging System Performance* [M]. America: JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 2000, Second Edition: 88—89.
- [8] Driggers R G, Vollmerhausen R, Kane B O. Sampled imaging sensor design using the MTF squeeze model to characterize spurious response[J]. *Proc. SPIE*, 1999, **3701**:61—73.
- [9] Vollmerhausen R. Incorporating display limitations into night vision performance models[J]. *IRIS Passive Sensors*, 1996, **2**:11—31.
- [10] PENG Xin-Hong, WU Yong-Chang, CHEN Yu-Liang. Performance evaluation of sampled imaging system[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (彭新红,吴常泳,陈雨良.采样成像系统性能评估. *红外与毫米波学报*), 2001, **20**(6):477—480.
- [11] WANG Xiao-Rui, ZHANG Jian-Qi, FENG Zhuo-Xiang, et al. Sampled IR imaging system simulation & MRTD prediction[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王晓蕊,张建奇,冯卓祥,等.采样红外成像系统仿真及最小可分辨温差预测方法研究. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(6): 436—440.