

文章编号: 0253-2239(2005)08-1036-6

凝视热成像系统的三角方向鉴别阈值曲线预测*

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, 西安 710071)
(² 西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘要: 为有效评价凝视成像系统的性能,依据凝视红外成像系统对红外辐射信号的转换机理,建立了凝视红外成像系统信号响应模型;利用线性系统理论和采样理论对成像系统的传递函数进行了分析建模;借助于三维噪声模型表征了系统的噪声特性。以成像系统建模为基础,模拟生成不同尺寸、不同辐射温差的等边三角形方位靶标图像;针对不同刺激强度的三角形靶标仿真图像,统计观察者对靶标方向正确鉴别的概率,引入视觉心理测量函数——韦布尔(Weibull)函数拟合观察者鉴别概率数据,实现了三角方向鉴别阈值(TOD)曲线的预测。与实际测量结果进行比较,显示了此方法预测三角方向鉴别阈值曲线的合理性。

关键词: 成像系统; 性能评估; 三角方向鉴别阈值; 心理测量函数

中图分类号: TN216 文献标识码: A

Triangle Orientation Discrimination Threshold Curve Prediction Based on Staring Thermal Imaging Simulation

Wang Xiaorui^{1,2} Zhang Jianqi¹ Feng Zhuoxiang² Chang Honghua¹

(¹ School of Technical Physics, Xidian University, Xian 710071)
(² Xian Institute of Applied Optics, Xian 710065)

Abstract: For the effective performance evaluation of staring imaging system, the signal response model of staring imaging system is established according to the conversion mechanism of infrared radiometric signal in the imaging process. The transfer function of imaging system is modeled using the linear system theory and sampling theory, and the noise is characterized with the three-dimensional noise model. Based on staring imaging system modeling, the triangle pattern simulation images with different differential temperatures and different sizes are generated. Triangle pattern simulation images with different stimulus intensities are observed, and the correct discrimination probability of the triangle pattern orientation is obtained utilizing the statistical method. The psychometric function-Weibull function is used to fit the probability data, and the triangle orientation discrimination (TOD) threshold prediction curve is achieved. The experimental results indicate that the triangle orientation discrimination threshold prediction curve is reasonable.

Key words: imaging systems; performance evaluation; triangle orientation discrimination threshold; psychometric function

1 引 言

凝视红外成像系统的测试与评估已成为国际上红外成像领域研究的热门课题。传统的最小可分辨温差(MRTD)度量标准采用的四周期矩形靶标,经过焦平面成像系统的输出图像表现出明显的欠采样噪声,而观察真实场景中的非周期目标,欠采样噪声

并不明显,这使得凝视红外系统的最小可分辨温差不能准确反映系统的现场性能。基于这种缺陷,研究人员提出了多种适用于焦平面成像系统性能评价的方法和模型:NVTherm模型^[1]、TRM3模型^[2]、动态最小可分辨温差(DMRTD)^[3]和三角方向鉴别阈值方法^[4~6]。通过比较上述模型,发现前三种度量方法是基于周期矩形样条的,采用不同的修正方

* 高等学校博士学科点专项科研基金(20030701003)和国家自然科学基金(60477038,60277005)资助课题。

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。E-mail: wx_rui@sohu.com

收稿日期: 2004-08-26; 收到修改稿日期: 2004-12-17

法达到与系统现场性能预测的一致,但修正过程比较复杂。而三角方向鉴别阈值法是荷兰 TNO 人类因素研究所的 Bijl 等^[4]最近提出的表征光电成像系统性能的新方法,此方法以非周期等边三角形方位靶标作为测试样条,操作方便,能最大程度地减小人眼的主观性,具有较强的理论基础和实验应用的优点,且能够准确地预测凝视红外成像系统的现场性能^[7]。虽然该方法显示了无比的优越性,但对其的研究还处于试验度量阶段。本文从凝视红外成像系统建模理论出发,生成了三角形标准靶的仿真图像,利用心理测量函数——韦布尔(Weibull)函数拟合了三角形靶标方向的正确响应概率数据点,进而实现了三角方向鉴别阈值曲线的预测,使图像仿真与成像系统性能预测相结合。

2 凝视红外成像系统建模

与光机扫描型红外成像系统相比,凝视型红外成像系统完全取消了光机扫描,以焦平面阵列作为信号的敏感部件。焦平面器件除了对辐射信号响应和转换外,还引入了两个明显的图像降质效应:探测器阵列各单元响应的不一致性导致的非均匀性(空间噪声)和欠采样导致的频谱混淆。接下来将从焦平面器件响应特性建模和光电系统传递函数两方面对上述效应分别进行分析。

2.1 焦平面器件响应特性建模

依据凝视红外成像原理,对绝对温度 T 的黑体辐射,凝视焦平面阵列第 i 个单元的响应信号经过系统增益放大后可表示为

$$V_i = G_i \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) \frac{M_e(\lambda, T) A_i \cos^N \theta_i}{4F^2 (1 + M_{opt})^2} \tau_{opt}(\lambda) T_{atm}(\lambda) d\lambda + D_i. \quad (1)$$

表 1 给出了式 1 中所涉及的各项变量的含义以及是否与探测元的空间坐标有关(有关则造成非均匀性产生空间噪声)。(1) 式给出了源辐射信号在成像系统输出端引起的绝对电压信号。对于红外成像系统,我们通常关心的是目标 T_T 与周围背景 T_B 辐射引起的相对差值信号:

$$\Delta V_i = G_i \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) \frac{[M_e(\lambda, T_T) - M_e(\lambda, T_B)] A_i \cos^N \theta_i}{4F^2 (1 + M_{opt})^2} \tau_{opt}(\lambda) T_{atm}(\lambda) d\lambda + D_i, \quad (2)$$

为简化起见,假定 $R_i(\lambda)$, $\tau_{opt}(\lambda)$, $T_{atm}(\lambda)$ 与 $M_e(\lambda, T)$ 无关且都是波长 λ 的连续函数,则根据积分中值定理,存在 $\lambda_c \in [\lambda_1, \lambda_2]$,使得(2) 式变为

$$\Delta V_i = G_i R_i(\lambda_c) A_i \cos^N \theta_i \tau_{opt}(\lambda_c) T_{atm}(\lambda_c) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{[M_e(\lambda, T_T) - M_e(\lambda, T_B)]}{4F^2 (1 + M_{opt})^2} d\lambda + D_i, \quad (3)$$

考虑光电成像系统的物距远远大于像距, $M_{opt} \rightarrow 0$,因此焦平面输出电压可近似为

$$\Delta V_i = G_i R_i(\lambda_c) A_i \cos^N \theta_i \tau_{opt}(\lambda_c) T_{atm}(\lambda_c) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{[M_e(\lambda, T_T) - M_e(\lambda, T_B)]}{4F^2} d\lambda + D_i, \quad (4)$$

表 1 探测器响应模型中变量的含义以及是否与空间坐标有关

Table 1 Variables in detector response model and relationship with spatial location

Variables	Definition	Whether or not space position dependent
G_i	System gain of the i th element	dependent
$R_i(\lambda)$	Responsivity of the i th element	dependent
$[\lambda_1, \lambda_2]$	Spectral transmission range of the optics	independent
$M_e(\lambda, T)$	Spectral radiant exitance of an ideal blackbody source	independent
θ_i	Off-axis angle of the i th element	dependent
F	f -number	independent
N	Roll-off exponent $2 < N < 4$	independent
M_{opt}	Magnification of optical system	independent
$\tau_{opt}(\lambda)$	Spectra transmission of optical system	independent
A_i	Area of the i th element	dependent
$T_{atm}(\lambda)$	Atmosphere spectra transmission	independent
D_i	Voltage of the dark current in the i th element	dependent

根据式(4)所表示的探测器响应模型可知,影响凝视成像系统各探测器单元响应输出信号不一致性的因素包括5个方面:光敏面积 A_i 、累积噪声 D_i 、探测元相对于光轴的偏角 θ_i 、探测器响应率 $R_i(\lambda)$ 和探测元信号的放大增益 G_i ;上述五个参量乘积的差异将使得焦平面器件产生非均匀响应。

2.2 凝视成像系统传递函数

整个凝视成像系统通常分成三个部分:前置滤波、空间采样和重建系统,如图1所示^[8~10]。成像器的输入为原始的场景图像,以 $i(x,y)$ 表示。在空

间域,输入图像与光学系统和探测器的脉冲响应函数卷积。这个脉冲响应函数称为系统的采样前滤波模糊,表示为 $h(x,y)$,包括焦平面采样前引入的所有效应(衍射、像差、振动和探测器形状模糊)。采样过程发生在采样前置滤波的连续输出和采样后置滤波的离散输入之间,抽样像素的大小决定积分抽样的影响,以采样网格函数 $s(x,y)$ 表示;重建系统进行电子滤波,对抽样过程引起的高阶频谱项进行截止或衰减,以脉冲函数 $d(x,y)$ 表示,包括电子滤波、像素插值、显示模糊等。

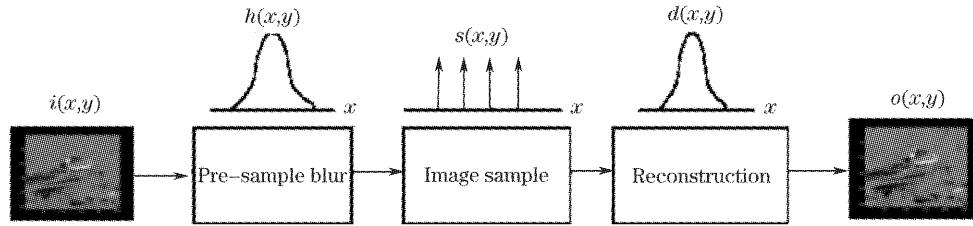


图1 凝视成像系统的空域描述

Fig. 1 Staring infrared imaging system represented in space

经过整个成像过程,输出图像 $o(x,y)$ 在空域中可描述为

$$o(x,y) = \{[i(x,y) * h(x,y)] * s(x,y)\} * d(x,y), \quad (5)$$

为了计算的方便,对式(5)进行傅里叶变换,在频域中可得

$$O(f_x, f_y) = \{[I(f_x, f_y) \times H(f_x, f_y)] * S(f_x, f_y)\} \times D(f_x, f_y), \quad (6)$$

式中 $*$ 表示卷积, (f_x, f_y) 表示空间频率, $S(f_x, f_y)$ 为采样网格函数的傅里叶变换,进一步分解可得

$$S(f_x, f_y) = \sum_{m,n} \delta(f_x - mf_{sh}, f_y - nf_{sv}) = \delta(f_x, f_y) + \sum_{m \neq 1, n \neq 1} \delta(f_x - mf_{sh}, f_y - nf_{sv}), \quad (7)$$

式中 f_{sh}, f_{sv} 分别表示水平和垂直方向的采样频率,将(7)式代入(6)式,有

$$O(f_x, f_y) = I(f_x, f_y)H(f_x, f_y)D(f_x, f_y) + \sum_{m \neq 0, n \neq 0} I(f_x - mf_{sh}, f_y - nf_{sv})H(f_x - mf_{sh}, f_y - nf_{sv})D(f_x - mf_{sh}, f_y - nf_{sv}), \quad (8)$$

式中第一项表示信号的基带频谱;第二项表示欠采样引起的频谱混淆,其大小不仅与输入信号频谱有关,还与焦平面探测元之间的采样间隔有关。具体的函数表达式在很多文献^[11]中都已提到,本文不再给出。利用上述传递函数表达式可将各模块参量与图像质量联系起来,评价系统参量对图像质量的影响程度。

2.3 系统噪声模拟

为了使仿真图像准确反映实际凝视成像系统的物理效应,除对红外焦平面器件的非均匀性(固定图样噪声)和成像系统的传递函数分析建模外,还应考虑影响成像质量的主要因素:系统的空时域随机噪声。本文借助于三维噪声模型^[12]对系统的随机噪声进行了建模仿真。其模拟方法如下:(1)首先根据红外成像系统的参量,计算噪声等效温差(NETD),

利用噪声带宽修正得到三维时空噪声分量 σ_{twh} ; (2)依据成像系统的帧频和视场的像素数目,生成一组与 σ_{twh} 有关的随机数;(3)结合红外成像系统响应模型和动态量化范围,映射模拟生成噪声灰度序列图像;(4)利用像素处理的方法,将得到的系统噪声灰度图像与经过前置滤波输出的图像序列进行像素值相加,得到探测器输出的仿真图像。

2.4 成像系统物理效应仿真效果图

利用探测器阵列的响应模型,考虑到光学系统的光谱透过滤、探测器的响应率、放大器的增益、模拟/数字转换和灰度量化的生成不同尺寸和不同灰度的等边三角形样条标准靶;然后根据光电系统传递函数模型和三维噪声模型,模拟系统各种物理效应:模糊、采样、噪声对三角靶标成像的调制;生成系统输出的三角形方位靶标仿真图像。

依据成像系统各种物理效应进入成像过程的顺序,针对某种型号凝视成像系统得到仿真效果图,如图 2 所示。

图 2(a)为仿真程序量化生成的原始图像,

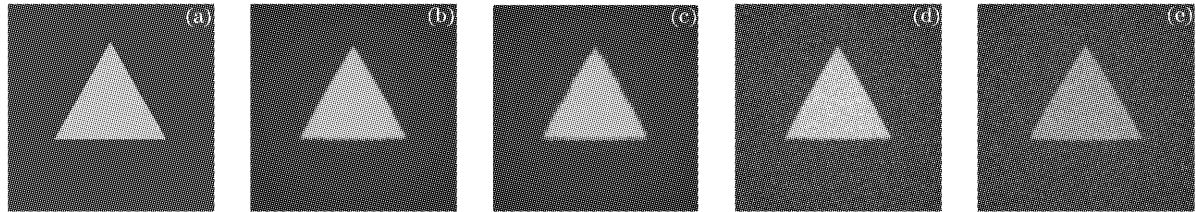


图 2 红外成像系统物理效应仿真效果图

Fig. 2 Simulation image of IR imaging system physical effects

3 三角方向鉴别阈值曲线预测及结果分析

三角方向鉴别阈值度量方法是利用不同尺寸、不同衬比度的等边三角形作为测试样条,通过红外成像系统,由人眼观察,进行多次测量,得到类似最小可分辨温差曲线的阈值衬比度与三角形尺寸之间的关系曲线。三角方向鉴别阈值曲线主要表征了观察者对不同刺激强度(尺寸、衬比度)的等边三角形样条方向鉴别的阈值曲线。为了实现这种曲线预测,本文从红外系统成像仿真的角度,利用建立的探测器响应模型和红外系统传递函数,考虑到系统各模块对辐射信号的调制和转换,模拟生成不同尺寸和不同灰度的等边三角形标准靶仿真图像。选定几组不同尺寸、方向随机(上、下、左、右)的三角形方位靶仿真图像,调整三角形靶的辐射温差,利用四选一测量方法(即观察者不管是否看清,必须选择四个方向中的一个)判断三角形方向,统计正确判断概率,对同一尺寸,不同温差标准靶的正确判断概率,利用韦布尔心理测量函数拟合测量数据点^[13],通过插值获得 75% 正确判断概率对应的阈值温差。重复以上过程,可实现不同尺寸标准靶的三角方向可鉴别阈值温差预测。最后根据实际成像系统的视场和探测单元尺寸,由像素数目计算得到不同角空间频率对应的三角方向可鉴别阈值温差,从而实现三角方向鉴别阈值曲线的预测。

3.1 心理测量函数

多次观察测量试验显示:观察者的正确响应因子是待测靶标尺寸和衬比度的函数,随靶标尺寸或衬比度的增加而单调增加,通常利用心理测量函数——韦布尔函数进行拟合,其函数表达式为

$$p_{opt}(x) = (1 - \delta) - (1 - \gamma - \delta) \cdot 2^{-(x/\alpha)^\beta}, \quad (9)$$

图 2(b)为加入空间模糊效应的效果图,图 2(c)为加入采样效应后的效果图,表现为明显的锯齿形边缘—欠采样频谱混淆,图 2(d)加入空时域噪声的效果图,图 2(e)为加入采样后重构滤波器的仿真图像。

其中 δ 是指在判断正确的情况下按错按钮或者错过观测时机的概率,通常可取 $\delta = 0.02$; γ 为完全分辨不出目标的情况下猜中目标的正确概率,在三角方向鉴别阈值测试中,要求每一次测试必须给出四个方向中的一个方向,即 $\gamma = 0.25$; α 代表刺激强度阈值; β 决定了函数的陡峭程度(或者说是斜率)。

采用心理测量函数来拟合观察者的正确判断概率数据点,首先将上式变形为

$$\ln \left[-\text{lb} \left(\frac{1 - \delta - p}{1 - \gamma - \delta} \right) \right] = \beta \ln x - \beta \ln \alpha, \quad (10)$$

$$\text{令 } Y = \ln \left[-\text{lb} \left(\frac{1 - \delta - p}{1 - \gamma - \delta} \right) \right], X = \ln x,$$

$$\text{则有 } Y = \beta X - \beta \ln \alpha, \quad (11)$$

用上式拟合测量数据,可以得到多项式系数 β 和 $-\beta \ln \alpha$ 的值,进而得到 α, β 的值。接着利用方程(12)得到正确判断概率为 75% 的数据点值 α_{75} , 即一定尺寸下对应的正确判断概率的阈值衬比度。

$$\frac{\alpha_{75}}{\alpha} = \left[-\text{lb} \left(\frac{0.25 - \delta}{1 - \gamma - \delta} \right) \right]^{1/\beta}. \quad (12)$$

3.2 预测方法及结果分析

三角方向鉴别阈值曲线预测过程包括两个主要环节,首先确定固定高衬比度($\Delta T = \pm 2 \text{ K}$)下的三角形靶标方向鉴别的阈值探测锐度(SA)—可鉴别的最小尺寸,在确定探测锐度的基础上选择尺寸更大的三角形标准靶仿真图像作为待测图像;调整特定尺寸的待测三角形方位靶标的温差,得到不同温差下的正确判断概率,利用心理测量函数拟合测量的数据点(温差,正确判断概率),获取拟合曲线,接着通过插值,得到 75% 正确判断概率对应的阈值温差;改变三角样条尺寸,重复上述过程,得到不同尺寸三角形样条在 75% 正确判断概率下对应的阈值温差,即得到阈值温差与三角形尺寸的关系曲线—

三角方向鉴别阈值曲线。具体实现方法如下：

(1) 在进行三角方向鉴别阈值曲线预测之前，首先要确定成像系统在高衬比度情况下能分辨的最小细节——探测锐度，然后，根据探测锐度确定三角方向鉴别阈值曲线测量所需三角形方位靶标的尺寸范围。其方法：设定三角形方位靶标温差为 2 K，通过粗调节三角形方位靶标尺寸，观察者判断三角形方向，得到正确鉴别概率；然后，利用韦布尔函数拟合不同三角靶尺寸对应的正确判断概率，获得此温差下 75% 正确判断概率对应的三角形方位靶标尺寸，即为传感器锐度(单位为 mrad)。

(2) 根据探测锐度，由三角形标准靶仿真程序生成八组标准靶图像，其尺寸由三角形目标角面积的均方根表示(单位为 mrad)。

(3) 在每次仿真测试中，每个尺寸的靶标设置 8 个温差数据点，且每一个温差的仿真三角形靶标方向随机(即上、下、左、右方向不确定)，并加以记录，先后 16 次或者更多次显示给观察者，观察者根据自己的判断，指示三角形标准靶的方向，同样记录三角形样条的判断方向，统计观察者正确的判断概率。三角形靶标尺寸不变，改变设置的温差，重复上述过程，就可得到不同温差的三角方位靶标对应的正确判断概率。接着利用韦布尔函数拟合温差与正确判断概率数据点，得到韦布尔函数曲线，进而得到 75% 正确判断概率点对应的温差 ΔT_1 。

(4) 改变三角形靶标尺寸，重复步骤(3)，得到其他标准三角形靶标尺寸下，75% 正确判断概率对应的温差 $\Delta T_2, \Delta T_3, \Delta T_4, \Delta T_5, \Delta T_6, \Delta T_7, \Delta T_8$ 。

(5) 利用二项式数据拟合，获取 75% 正确判断概率下对应的阈值温差与三角形标准靶角尺寸倒数的关系曲线——三角方向鉴别阈值曲线。

利用上述度量方法，本文针对典型凝视红外成

像系统物理参量，如表 2 所示。

表 2 用于试验仿真的凝视红外成像系统的基本物理参量
Table 2 Fundamental parameters of typical infrared imaging system for experimental simulation

Focal plane array	320 pixel×240 pixel
Detector pitch	40 μm
Detector size	32 μm
Field-of-view	6°×4.5°
Optics focal length	120 mm
f-number	2
Frame frequency	30 Hz
D^*	$1 \times 10^{11} \text{ cm (Hz)}^{1/2} / \text{W}$

依据红外辐射信号的增益特性和空间分布变换特性，利用红外三角靶图像生成流程，生成温差和尺寸可控制的八组三角形标准靶，然后加入系统各种物理效应：空间模糊效应、欠采样频谱混淆、非均性响应、噪声、重构滤波，得到系统输出标准靶仿真图像。八组三角形标准靶的角空间频率分别为 0.125 c/mrad, 0.33 c/mrad, 0.625 c/mrad, 0.83 c/mrad, 1 c/mrad, 1.25 c/mrad, 2 c/mrad, 2.5 c/mrad。再结合预测方法，得到八组角空间频率标准靶的 75% 正确鉴别概率对应的阈值温差 0.062 K, 0.093 K, 0.138 K, 0.174 K, 0.22 K, 0.32 K, 0.88 K, 1.28 K。图 3(a)、图 3(b) 分别给出其中三角形标准靶角空间频率为 1 c/mrad 和 2 c/mrad 时的韦布尔函数拟合曲线，并计算得到对应 75% 正确鉴别概率的阈值温差，拟合数据所得的 $\alpha, \beta, \alpha_{75}$ 的值标注在图形下方，横轴表示目标与背景的温差，纵坐标表示观察者对三角形标准靶尺寸的正确判断概率。其它角空间频率标准靶的韦布尔函数拟合曲线，限于篇幅没有给出。图 4 给出了 75% 正确判断概率对应的阈值温差与标准靶角空频率的关系曲线。

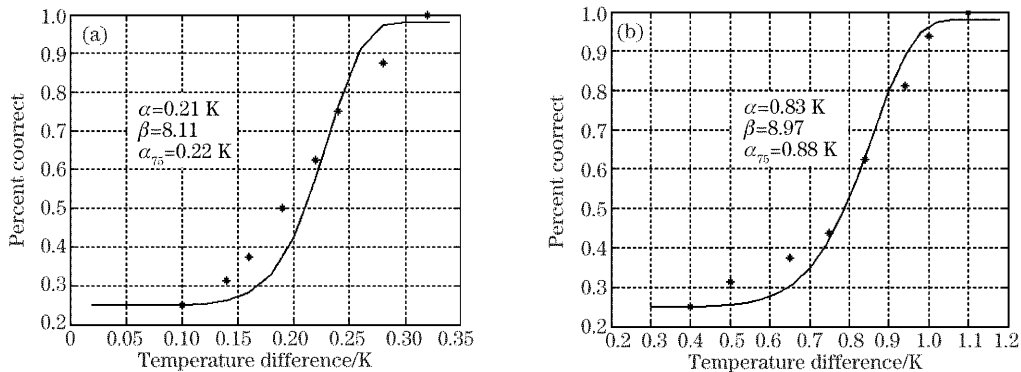


图 3 角空间频率为(a) 1 c/mrad 和(b) 2 c/mrad 的韦布尔拟合曲线

Fig. 3 Weibull function fitting curve corresponding to angle spatial frequency: (a) 1 c/mrad and (b) 2 c/mrad

为了验证成像系统仿真三角方向鉴别阈值预测曲线的准确性,我们设计了八种不同尺寸的三角形标准靶样条,针对相同的凝视红外成像系统,在 SBIR 公司生产的 IRWindowTM2001 测试系统上替换四杆靶,采用文献[13]提供的测量方法,获取了三角方向鉴别阈值测量曲线,如图 5 所示。通过比较,发现预测的三角方向鉴别阈值曲线的变化趋势和数值范围与实际测量的三角方向鉴别阈值曲线有很好的—致性,初步验证了基于成像仿真三角方向鉴别阈值曲线预测方法的合理性。

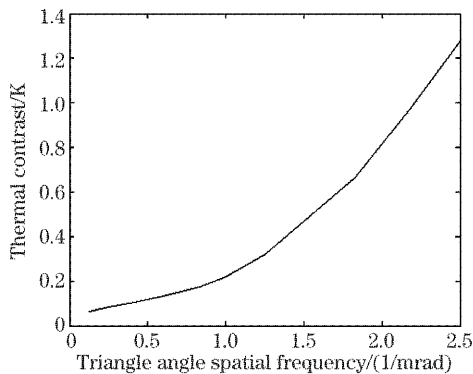


图 4 三角方向鉴别阈值预测曲线

Fig. 4 TOD prediction curve

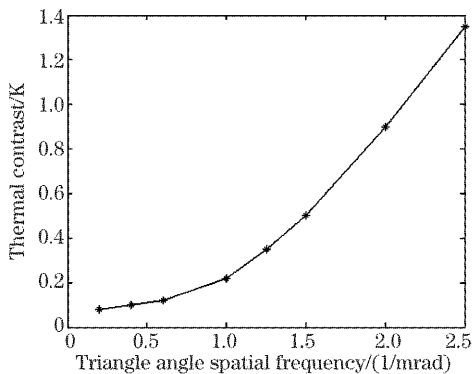


图 5 三角方向鉴别阈值测量曲线

Fig. 5 TOD measured curve

4 结 论

利用红外辐射信号转化方程生成三角形方位靶仿真图像,并考虑了凝视红外成像系统的各种物理效应对图像质量的影响,重点研究了焦平面器件非均匀性和系统传递函数的建模方法,逼真地模拟了凝视成像系统输出标准靶图像。并以标准靶图像为基础,研究了三角方向鉴别阈值曲线的预测方法,统

计了观察者对三角形方位靶标方向的正确鉴别概率,并利用韦布尔心理测量函数实现了三角方向鉴别阈值曲线的预测,使图像仿真与成像系统性能预测相结合。通过与实际测量的三角方向鉴别阈值曲线进行比较,初步验证了该预测曲线的合理性。但要成为红外成像系统性能的新度量标准,必须针对各种类型成像系统,测量大量的实验数据,进一步修正和完善成像系统模型和三角方向鉴别阈值预测方法,这将是未来的工作重点。

参 考 文 献

- 1 R. G. Driggers, R. Vollmerhausen, B. O'Kane. Sampled imaging sensor design using the MTF squeeze model to characterize spurious response[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3701**: 61~73
- 2 W. Wittenstein, Thermal Range Model TRM3 [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3436**: 413~424
- 3 Curtis M. Webb, Carl E. Halford. Dynamic minimum resolvable temperature testing for staring array imagers[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(5): 845~851
- 4 P. Bijl, J. M. Valetton. TOD, a new method to characterize electro-optical system performance [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3377**: 182~193
- 5 P. Bijl, J. M. Valetton. Triangle orientation discrimination, the alternative to minimum resolvable temperature and minimum resolvable contrast[J]. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(7): 1976~1983
- 6 Joseph Kostrzewa, John Long, John Graff *et al.*. TOD versus MRT when evaluating thermal imagers that exhibit dynamic performance[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5076**: 220~232
- 7 Piet Bijl, J. Mathieu Valetton, Arie N. de Jong. TOD predicts target acquisition performance and scanning thermal imager[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4030**: 96~103
- 8 Zhang Haitao, Zhao Dazun. Quantitative analysis of aliasing effects in opto-electric imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(12): 1649~1654 (in Chinese)
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
- 9 Chen Zhikuan, Zhai Hongchen, Mu Guoguang. Optical transfer function in an opto-electric scanning image [J]. *Optical Technology*, 1998, (1): 57~60 (in Chinese)
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
- 10 Zhou Jie, Qiu Shenggen, Liu Xu *et al.*. Measurement system of projection lens based on CCD modulation transfer function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 260~263 (in Chinese)
周杰,邱胜根,刘旭等. 应用 CCD 的投影物镜调制传递函数测量系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 260~263
- 11 Zhang Jingxian, Li Yudan, Jin Weiqi. *Low-Light-Level and Infrared Imaging Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. 229~235 (in Chinese)
张敬贤,李玉丹,金伟其. *微光与红外成像技术* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. 229~235
- 12 J. D'Agostino, C. Webb. 3-D analysis framework and measurement methodology for imaging system noise[C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1488**: 110~121
- 13 P. Bijl, J. M. Valetton. Guidelines for accurate TOD measurement[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3701**: 14~25