

## 基于自然背景的热成像系统信息量评价方法

王吉晖, 王小微, 陈松林, 金伟其

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究自然环境因素对热成像系统综合性能的影响, 在 MRTD 信道宽度热成像系统综合性能评价模型基础上, 对比 TTP 模型, 引入自然背景噪声因子, 构建了基于自然背景的热成像系统综合性能信息量评价模型, 通过实验给出了自然背景噪声因子的确定方法, 并建立了模型的归一化形式。以典型场景为例, 通过实验分析了不同自然背景对热成像系统目标信息量获取的影响, 并与 TTP 模型的分析结果进行比较, 二者具有较好的一致性。实验表明基于自然背景的热成像系统综合性能信息量评价模型能够较好地反映自然背景复杂度对系统综合性能的影响, 可以应用于系统性能评价。

**关键词:** 热成像系统; MRTD; 自然背景; 信息量模型

中图分类号: TN219 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)03-0772-07

## Information quantity evaluation of thermal imaging systems based on nature background

Wang Jihui, Wang Xiaowei, Chen Songlin, Jin Weiqi

(Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System (Beijing Institute of Technology), Ministry of Education,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to research the impact of nature environment on the synthesized performance of thermal imaging systems, a nature background noise factor was presented and introduced into MRTD-CW model comparing with Target Task Performance (TTP) model. An information quantity model based on MRTD-CW model with the nature background factor was proposed to evaluate the impact of nature environment on the synthesized performance of thermal imaging systems. The algorithm of the nature background noise factor was defined by experiments and the normalized form of the information quantity model with the nature noise factor was given. Taking typical scenes as examples, the impact of nature background noise on the synthesized performance of thermal imaging systems was analyzed by the information quantity model with nature background noise factor, and which was consistent with those of TTP model. Results show that the information quantity model with nature background noise factor can analyze the impact of nature background complexity on the synthesized performance of thermal imaging systems and can be applied to the evaluation of thermal imaging systems.

**Key words:** thermal imaging systems; MRTD; nature background; information quantity model

收稿日期: 2013-07-09; 修订日期: 2013-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(61007057); 武器预研基金(9140A17020211BQ0143)

作者简介: 王吉晖(1975-), 女, 讲师, 博士, 主要从事光电成像理论、系统性能评价及图像处理等方面的。

Email: wjhzhaojie@bit.edu.cn

## 0 引言

热成像技术在军事和民用领域都有着广泛的应用,热成像系统性能评价是热成像技术的重要研究内容之一。传统的 MRTD-Johnson 模型没有考虑自然环境复杂程度对热成像系统目标获取的影响,导致热成像系统设计性能和使用性能存在偏差。近年来,研究者对上述问题进行了研究和探索<sup>[1-6]</sup>。其中,美国 NVESD (Night Vision and Electronic Sensors Directorate) 提出 TTP(Targeting Task Performance)模型<sup>[1-5]</sup>,用 TTP 模型代替 Johnson 准则完成对热成像系统目标获取性能的评价。在 TTP 模型中引入目标表观对比度参数反映环境因素对目标获取的影响。笔者提出了基于 MRTD 信道宽度的热成像系统综合性能评价模型(MRTD-CW)<sup>[7-8]</sup>,该模型以信息论中信道宽度理论为基础,以人眼与光电成像系统匹配获得目标信息量最大化为系统性能最优化准则,可有效评价热成像系统最佳角放大率,电子变倍功效等。但 MRTD-CW 模型没有考虑自然环境复杂程度对热成像系统的影响,需要进一步的改进和完善。文中将在 MRTD-CW 模型基础上,比对 TTP 模型,引入自然背景噪声因子,研究自然环境因素对热成像系统综合性能的影响。引入了归一化参量,构建基于自然背景的热成像系统综合性能信息量评价模型,对比不同背景下的实验,分析实验结果并与 TTP 模型的分析结果进行比较。

## 1 TTP 模型

TTP 模型把人眼与热成像系统组成综合系统,基于系统对比度阈值传递函数对系统性能进行评价。它在评价系统性能时不仅可以反映系统的极限分辨能力,而且通过积分可以反映系统对目标综合信息的探测能力<sup>[1-5]</sup>,原理如图 1 所示。TTP 模型的表达式为:

$$TTP = \int_{f_{low}}^{f_{cut}} \left\{ \frac{C_{tgt} \cdot MTF_{sys}(f)}{CTF_{eye}(f) \cdot \left[ 1 + \frac{\alpha^2 \cdot PSD \cdot Q_H(f) \cdot Q_V(f)}{L^2} \right]} \right\}^{1/2} df \quad (1)$$

式中:  $MTF_{sys}$  为系统的调制传递函数;  $CTF_{eye}$  为人眼的对比度阈值传递函数;  $f_{low}, f_{cut}$  分别为  $CTF_{eye}$  与  $C_{tgt}$   $MTF_{sys}$  曲线的交点; PSD 为噪声功率谱密度;一般  $\alpha$

的取值为  $169.6 \text{ Hz}^{1/2}$ ;  $Q_H(f)$  为水平方向噪声空间滤波器;  $Q_V(f)$  为垂直方向噪声空间滤波器;  $L$  为显示器输出平均亮度时的场景温度。  $C_{tgt}$  为目标表观对比度:

$$C_{tgt} = \frac{\Delta T_{Rss}(R=0) \cdot \tau_a(R)}{2S_{imp}} \quad (2)$$

$$\Delta T_{Rss} = \sqrt{(u_{tgt} - u_{bkg})^2 + \sigma_{tgt}^2} \quad (3)$$

式中:  $u_{tgt}$  为目标平均温度;  $u_{bkg}$  为背景平均温度;  $\sigma_{tgt}$  为目标温度的标准偏差;  $\tau_a(R)$  为大气透过率;  $S_{imp}$  为目标附近的平均场景温度。

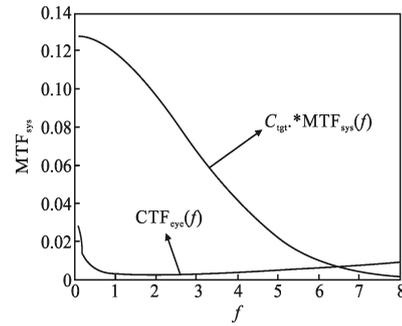


图 1 TTP 模型关系曲线  
Fig.1 Curves of TTP model

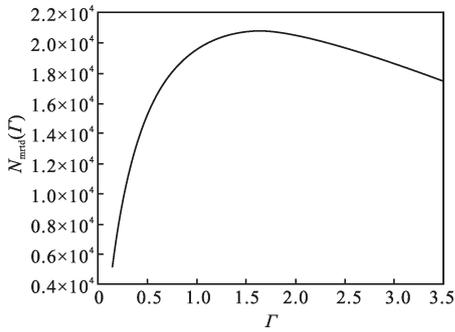
## 2 MRTD-CW 模型

### 2.1 MRTD-CW 模型

该模型以信息论中信道宽度理论为基础,以人眼与光电成像系统匹配获得目标信息量最大化为系统性能最优化准则,包含对系统最高空间频率内积分特性的描述,可有效评价热成像系统最佳角放大率,获得人眼距离监视器的最佳观察距离<sup>[7-8]</sup>。MRTD-CW 模型表达式如下:

$$N_{mtd}(I) = \int_0^{f_m} \left[ \frac{1}{MRTD(f)} \right]^2 df = \left[ \frac{8}{SNR_{th} \cdot \sigma_{vth} \cdot \pi^2} \right]^2 \int_0^{f_m} \left[ \frac{MTF_{sys}(f)}{CTF_{eye}(f/I) \cdot k(f)} \right]^2 df \quad (4)$$

式中参数的具体含义见参考文献[8]。  $f_m$  是系统的极限分辨力,通过积分获得热成像系统对目标获取的综合能力。  $N_{mtd}(I)$  为单峰曲线,反映经过热成像系统后人眼获得的目标信息量,最高点对应系统的最佳角放大率。如图 2 所示,对应的系统最佳角放大率为 1.6。

图 2 热成像系统的  $N_{\text{netd}}(\Gamma)$  曲线Fig.2  $N_{\text{netd}}(\Gamma)$  curve of thermal imaging systems

## 2.2 TTP 模型和 MRTD-CW 模型比较

TTP 和 MRTD-CW 模型都可以用来评价热成像系统性能,对比两个模型,相同点:都是基于人眼视觉对比度阈值函数  $\text{CTF}_{\text{eye}}(f)$ ,且采用频域积分方式获得特征评价参量;不同点:(1) 在被积函数的幂次及积分限等方面有区别,TTP 模型基于系统的对比度特性,而 MRTD-CW 模型基于系统的信噪比特性;(2) 单位不同,TTP 模型的单位是 cyc/mrad,而 MRTD-CW 的单位是 (cyc/mrad)/K<sup>2</sup>;(3) TTP 模型已经用于热成像系统获取战场目标作用距离的预测,而 MRTD-CW 模型主要集中于系统自身综合性能的评价,在热成像系统作用距离预测方面还有待于进一步的研究。

## 2.3 MRTD-CW 模型的修正

为进一步完善 MRTD-CW 模型,使其具有明确的物理意义,在对比 TTP 模型的基础上,对 MRTD-CW 模型进行修正。MRTD-CW 模型是以 MRTD 为基础建立的,MRTD 是实验室静态性能参数,其对热成像系统进行性能评价时认为背景是均匀的。现在考虑自然背景复杂度对热成像系统综合性能的影响,在 MRTD-CW 模型中引入自然背景参量。自然背景参量的引入过程如下:

设热成像系统接收到的目标图像信噪比  $\text{SNR}_0$  为:

$$\text{SNR}_0 = \frac{\Delta T}{k(f) \cdot \text{NETD}} \quad (5)$$

式中: $T$  为目标与背景的温差;NETD 为噪声等效温差; $k(f)$  为修正系数。令观察者能分辨条带的阈值信噪比为  $\text{SNR}_{\text{DT}}$ ,公式(5)解出  $\Delta T$  就是 MRTD 的表达式:

$$\text{MRTD} = k(f) \cdot \text{NETD} \cdot \text{SNR}_{\text{DT}} \quad (6)$$

但是实际目标获取过程除了受系统噪声 NETD 影响外,还受自然环境背景的影响。因此,热成像系

统的综合噪声均方根  $V_n$  为:

$$V_n = \sqrt{\text{NETD}^2 + \sigma_b^2} = \text{NETD} \sqrt{1 + \sigma_b^2 / \text{NETD}^2} = \text{NETD} \cdot \delta \quad (7)$$

式中: $\sigma_b$  为自然背景噪声均方根; $\delta$  为系统综合噪声参量。修正后的 MRTD<sub>m</sub> 公式为:

$$\text{MRTD}_m = k(f) \cdot \text{NETD} \cdot \delta \cdot \text{SNR}_{\text{DT}} = \text{MRTD} \cdot \delta \quad (8)$$

引入经过大气传输后目标与背景的表观温差  $\Delta T$ ,表达式为:

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot \tau_a(R) \quad (9)$$

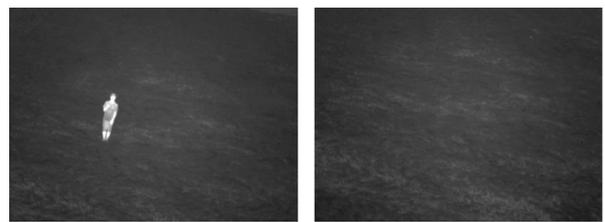
式中: $\tau_a(R)$  为大气透过率; $R$  为目标到红外成像系统的距离; $\Delta T_0$  为  $R$  为 0 时的目标与背景的温差。把公式(9)代入公式(4),则公式(4)变为:

$$N_{\text{MRTD}}(\Gamma) = \int_0^{\Gamma} \left[ \frac{\Delta T}{\text{MRTD}(f) \cdot \delta} \right]^2 df \quad (10)$$

修正后的 MRTD-CW 模型,考虑了自然环境噪声的影响,考虑了大气对目标探测的影响,引入了目标与背景的表观温差  $\Delta T$ ,单位是 cyc/mrad,在对热成像系统性能进行评价时,与 TTP 模型单位相同,具有可比性。

## 2.4 $\tau_b$ 值的确定

$\tau_b$  是自然背景噪声的表征参量,在对系统性能进行评价时,其与当时的大气状况、目标获取距离等因素有关。由于自然环境复杂,在研究时,将自然背景的选取范围缩小至典型场景(如草地、水泥地、树林、沙漠、雪地)。参考文献[9]给出了  $\tau_b$  值的确定实验过程。图 3 以草地场景为切入点进行研究,给出  $\tau_b$  值在不同距离处的获取方法。



(a) 带有目标

(b) 没有目标

(a) With the target

(b) Without the target

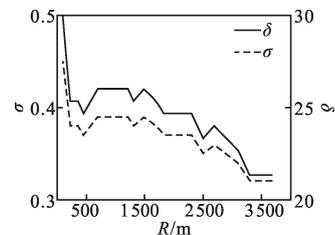
(c)  $\sigma_b$  和  $\delta$  随距离的变化(c)  $\sigma_b$  and  $\delta$  with different distances

图 3 草地图片

Fig.3 Images of lawn

可以看出,随着距离的变化,背景噪声虽然是波动的,但总体趋势是随着距离的增加,背景噪声方差值减少,即背景噪声变化减小。这与实际使用中当目标与热成像系统的距离很大时,可以把背景看作均匀是相符合的。由于受热像仪光学镜头焦距选择的限制,不同距离下目标热图像采用计算机模拟的方法获得,即拍摄给定距离处的目标热图像,利用大气传递函数模拟出不同距离处热像仪获得的红外图像,按照均方差公式计算出不同距离处自然场景  $\tau_b$  的大小。

**2.5 模型的归一化**

比较公式(10)和公式(4),可发现  $N_{MRTD}(f)$  式中多了目标与背景的表现温差  $\Delta T$  和背景噪声  $\delta$  两项影响因子。修正后的 MRTD-CW 模型,考虑了自然背景和背景温差的影响,且  $N_{mtd}(\Gamma)$  可以看做是  $N_{MRTD}(\Gamma)$  在  $\delta=1, \Delta T=1$  时的情形。图 4 给出修正后取  $\Delta T=6.33, \delta=30$ , 和没有修正时的  $N_{mtd}(\Gamma)$  对比图,计算用热像仪参数见表 1。

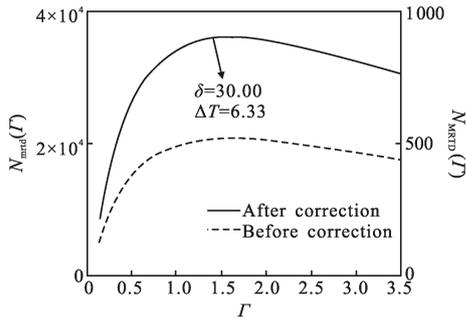


图 4  $N_{MRTD}(\Gamma)$  与  $N_{mtd}(\Gamma)$  曲线对比

Fig.4 Comparison between  $N_{MRTD}(\Gamma)$  and  $N_{mtd}(\Gamma)$

表 1 中波制冷热像仪主要参数

Tab.1 Main parameters of mid-wave thermal imaging system

Parameter	Value
Focal length/mm	50
Aperture	F/2
Detector width and length/ $\mu\text{m}$	25, 25
Pitch/ $\mu\text{m}$	30 $\times$ 30
Spectral response/ $\mu\text{m}$	3.7-4.8
NETD/mK	15

可以看出修正前后模型确定的系统最佳角放大率的值没有变化,但系统获得的目标信息量发生了改变。黑体背景下系统获得的目标信息量比加入背景后系统获得的目标信息量要大得多。同时也可以看出,模型获得的系统性能信息量的值修正前后都

很大,无法定量地表征热成像系统的综合性能。为了能更清晰地表达热成像系统的综合性能,将对公式(10)进行归一化处理。

归一化参数设定为黑体背景下,温差  $\Delta T=1$ ,最佳角放大率处对应的热成像系统获取目标的综合信息量。

$$N_{mtd}(\Gamma_{optimal})=K \int_0^{f_m} \left[ \frac{MTF_{sys}(f)}{CTF_{eye}(f/\Gamma_{optimal}) \cdot k(f)} \right]^2 df \quad (11)$$

式中:  $K$  为常数。因此,公式(10)的归一化表达式  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  为:

$$\eta_{MRTD}(\Gamma)=N_{MRTD}(\Gamma)/N_{mtd}(\Gamma_{optimal})=$$

$$\int_0^{f_m} \left[ \frac{\Delta T}{MRTD(f) \cdot \delta} \right]^2 df / (N_{mtd}(\Gamma)_{max}) \quad (12)$$

式中:  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  是没有单位的量值,可以很直观地反映不同背景不同角放大率下,热成像系统对目标信息量的获取情况。公式(11)同样可用于  $N_{mtd}(\Gamma)$  的归一化。图 5 给出的是某热像仪归一化后系统综合性能的表现,条件为温差  $\Delta T=1$ ,黑体背景。

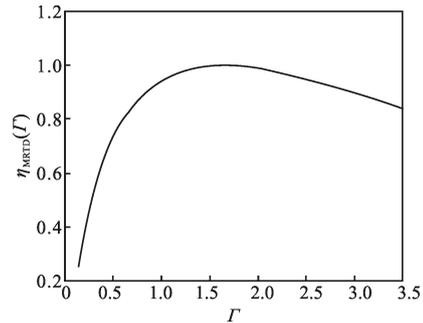


图 5 归一化  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  曲线

Fig.5 Normalized  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  curve

**3 模型的实验研究**

通过实验验证修正前后模型归一化形式对热成像系统综合性能的描述。实验所用中波制冷热像仪的参数见表 1,热像仪的温度标定结果见图 6。

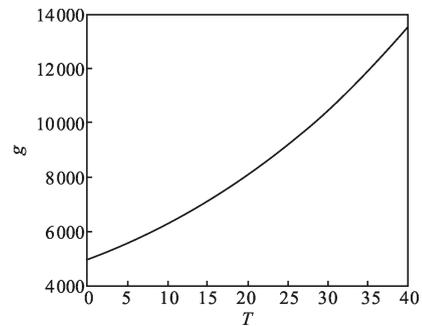
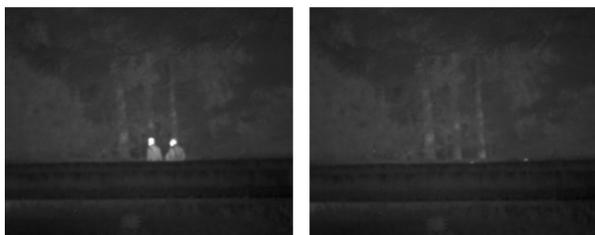


图 6 热像仪所采热图的灰度与温度的对应关系曲线

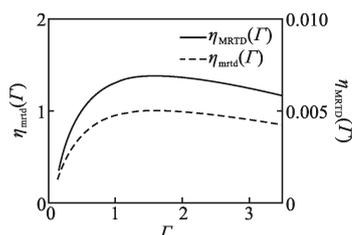
Fig.6 Relation curve between gray scale and temperature

### 3.1 树林背景实验

天气状况:晴;季节:冬季;拍摄时间:下午3点;拍摄距离:110 m。图7(a)为以树林为背景,人为目标图像;图7(b)为只有树林背景图像。



(a) 带有目标 (b) 没有目标  
(a) With the target (b) Without the target



(c) 树林背景  $\eta_{\text{MRTD}}(\Gamma)$  与黑体背景  $\eta_{\text{mtd}}(\Gamma)$  对比图  
(c) Comparison between  $\eta_{\text{MRTD}}(\Gamma)$  and  $\eta_{\text{mtd}}(\Gamma)$

图 7 树林背景

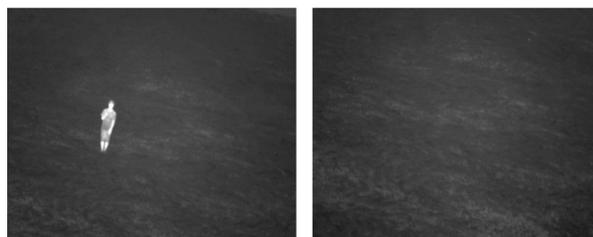
Fig.7 Woods background

拍摄距离 110 m 情况下,计算出背景的平均温度为  $0.92^\circ$ ,目标的平均温度为  $6.07^\circ$ ,目标与背景表观温差为  $5.15^\circ$ ,计算出  $\sigma_b$  为  $0.92 \text{ K}$ 。按照公式(11)条件设置,计算出热成像系统最佳角放大率处对应的目标信息量数值为 20 679,以此值作为归一化参数。为了方便与黑体背景下的  $\eta_{\text{mtd}}(\Gamma)$  曲线比较,把该次实验的  $\eta_{\text{MRTD}}(\Gamma)$  曲线与  $\eta_{\text{mtd}}(\Gamma)$  曲线放在同一幅图中,如图 7(c)所示。右侧纵坐标表示实验背景  $\eta_{\text{MRTD}}(\Gamma)$  曲线纵坐标,左侧纵坐标表示黑体背景下的  $\eta_{\text{mtd}}(\Gamma)$  曲线的纵坐标。从图 7 可以看出在实验背景条件下,系统获得的目标信息量为黑体背景下系统获取到的目标信息量的 0.007 倍,比黑体背景条件下小了很多,这说明自然背景对目标信息量的获取影响非常大。

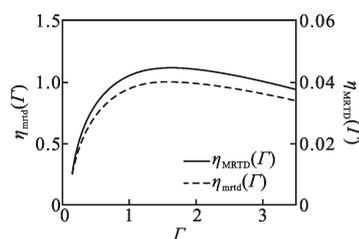
### 3.2 草地背景实验

图 8 为大雨过后,场景为修剪整齐的草地,目标为人,拍摄时间为晚上 9 点,拍摄距离为 100 m。背景平均温度为  $20.60^\circ$ ,  $\sigma_b=0.45 \text{ K}$ ,目标平均温度为  $26.93^\circ$ ,目标与背景表观温差为  $6.33^\circ$ ,以 20 679

为归一化参数,  $\eta_{\text{MRTD}}(\Gamma)$  与  $\eta_{\text{mtd}}(\Gamma)$  的比较如图 8(c) 所示。



(a) 带有目标 (b) 没有目标  
(a) With the target (b) Without the target



(c) 草地背景  $\eta_{\text{MRTD}}(\Gamma)$  与黑体背景  $\eta_{\text{mtd}}(\Gamma)$  对比图  
(c) Comparison between  $\eta_{\text{MRTD}}(\Gamma)$  and  $\eta_{\text{mtd}}(\Gamma)$

图 8 草地背景

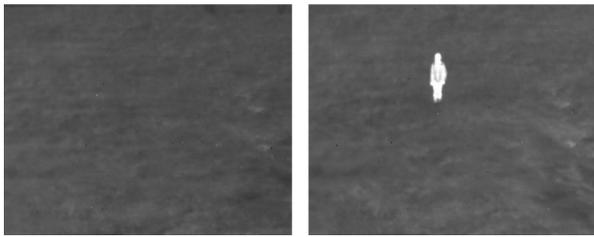
Fig.8 Grassland background

可以看出,在以草地为背景和系统最佳角放大率为 1.6 的条件下,热成像系统获得的目标信息量为黑体背景下获取到的目标信息量的 0.045 倍,比黑体背景条件下小很多,但是比图 7 所示的树林背景下热成像系统获得的目标信息量(0.007)大一些。这是因为草地背景下的噪声比树林背景下的噪声小的缘故,这与实际背景复杂度是相符的。

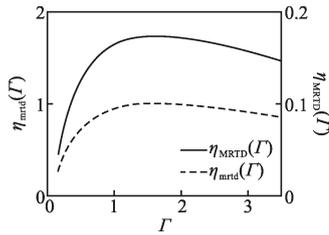
### 3.3 雪地背景实验

天气状况为小雪,拍摄距离为 100 m,雪地为背景,人为目标。背景平均温度为  $-6^\circ$ ,  $\sigma_b=0.18 \text{ K}$ ,目标平均温度为  $-1^\circ$ ,目标与背景表观温差为  $5^\circ$ 。把此次实验的  $\eta_{\text{MRTD}}(\Gamma)$  曲线与黑体背景下的  $\eta_{\text{mtd}}(\Gamma)$  曲线放在同一幅图中,如图 9(c)所示。

可以很清晰地看出,雪地背景下,热成像系统在不同角放大率时获得目标的信息量情况。在最佳角放大率 1.6 处,系统获得的目标信息量为黑体背景下获取到的目标信息量的 0.17 倍,比树林背景和草地背景下系统获得的目标信息量都大。这与实际草地和树林背景比雪地背景复杂是一致的。



(a) 没有目标 (b) 带有目标  
(a) Without the target (b) With the target



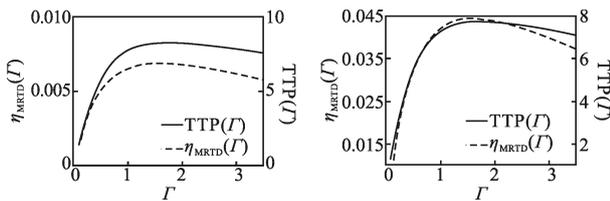
(c) 雪地背景  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  与黑体背景  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  对比图  
(c) Comparison between  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  and  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$

图 9 雪地背景

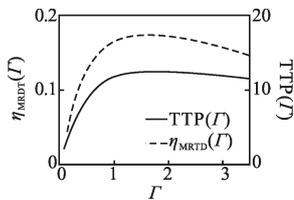
Fig.9 Snowfield background

### 3.4 TTP 和 $\eta_{MRTD}$ 的比较

依据上述实验数据, 对比  $TTP(\Gamma)$  和  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  的计算结果, 绘出图形如图 10 所示。



(a) 草地背景 (b) 树林背景  
(a) Grassland background (b) Woods background



(c) 雪地背景  
(c) Snowfield background

图 10  $TTP(\Gamma)$  与  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  的比较

Fig.10 Comparisons between  $TTP(\Gamma)$  and  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$

$TTP(\Gamma)$  和  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  均为单峰曲线,  $TTP(\Gamma)$  在  $\Gamma=1.8$  时达到峰值,  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  在  $\Gamma=1.6$  时达到曲线峰值, 两个模型确定的热成像系统最佳角放大率值非常接近。这说明含有背景噪声参量的 MRTD-CW 模型在

对热成像系统进行性能评价时与 TTP 模型具有可比性, 但二者之间的相关性还需要进一步研究。从图 10 可以看出, 在不同的背景下, 热成像系统对目标信息量的获取是不一样的。如何把 TTP 模型确定的热成像系统获取的目标信息量与  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  确定的热成像系统获取到的目标信息量建立起联系, 使  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  值在目标获取应用中具有更加明确的物理意义, 还需要进一步地研究。

## 4 结束语

文中在 MRTD-CW 模型基础上, 对比 TTP 模型, 引入自然背景噪声因子, 研究自然环境因素对热成像系统综合性能的影响。引入归一化参量, 构建了基于自然环境的热成像系统综合性能信息量评价模型。以典型场景为例, 通过实验给出不同自然背景下热成像系统对目标信息量的获取情况, 分析了实验结果, 并与 TTP 模型的分析结果进行了比较。下一步将研究 TTP 模型确定的热成像系统获取到的目标信息量与  $\eta_{MRTD}(\Gamma)$  确定的热成像系统获取到的目标信息量的关系。

### 参考文献:

- [1] Richard H Vollmerhausen, Eddie Jacobs, Ronald G Driggers. New metric for predicting target acquisition performance[J]. *Opt Eng*, 2004, 43(11): 2806-2818.
- [2] Driggers Ronad G, Jacobs Eddies L, Vollmerhausen Richard H. Current infrared target acquisition approach for military sensor design and wargaming[C]//SPIE, 2006, 6207: 620709.
- [3] Jin Weiqi, Wang Jihui, Wang Xia, et al. Development on performance evaluation of thermal imaging systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 7-13. (in Chinese)  
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.
- [4] Todd W Du Bosq, Jonathan D Fanning. Limitation of contrast enhancement for infrared target identification [C]// SPIE, 2009, 7300: 73000G.
- [5] Todd W Du Bosq, Jonathan D Fanning. Modeling the effects of contrast enhancement on target acquisition performace[C]// SPIE, 2008, 6941: 69410K.
- [6] Zhang Jianqi, He Guojing, Liu Delian, et al. Impact of background clutter on IR imaging system performance [J], *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 565-568. (in

Chinese)

张建奇, 何国经, 刘德连, 等. 背景杂波对红外成像系统性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 565-568.

- [7] Wang Jihui, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. Performance evaluation of thermal imaging systems based on MRTD channel width [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(4): 256-260. (in Chinese)  
王吉晖, 金伟其, 王霞, 等. 基于 MRTD 信道宽度的热成像系统性能评价理论研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(4): 256-260.

- [8] Wang Jihui, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. General performance evaluation on thermal imaging systems with the square integral method based on MRTD channel width[C]// SPIE, 2007, 68530: 68350S.

- [9] Wang Xiaowei. The evaluation of the amount of information model for the comprehensive performance of thermal imaging system based on natural background [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012. (in Chinese)  
王小微. 基于自然背景的热成像系统综合性能评价信息量模型[D]. 北京: 北京理工大学, 2012.