

烟幕对红外热成像干扰效果评价

韩宏伟, 张晓晖

(海军工程大学 兵器工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 烟幕是对抗红外侦察与制导的有效手段。为了定量评估和评价烟幕对红外热成像干扰的效果, 从理论和实验两方面进行了研究。理论上, 依据作用距离准则, 从辐射对比度入手, 建立了烟幕干扰下的红外热成像视距方程, 从而可以通过估算干扰前后热成像系统作用距离的变化来分析评价烟幕干扰的效果。实验中, 首先测定了烟幕对不同波段辐射的透过率。然后以人体作为观察目标, 基于相似度准则, 引入归一化互信息指标作为评价标准, 并和直接观察结合来分析红外热成像效果受烟幕干扰的情况。结果表明, 在烟幕干扰下, 当红外热成像系统无法达到识别要求时, 目标与背景表观对比度下降到固有对比度的 4% 以下, 对应的烟幕透过率为 55%, 且理论计算与实验分析相符。

关键词: 烟幕干扰; 辐射对比度; 视距; 归一化互信息

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1204004

Evaluation of interference effects of smokescreen on IR imaging

Han Hongwei, Zhang Xiaohui

(College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Smokescreen is effective to counter infrared reconnoiter and guide. In order to assess and evaluate the ability of smokescreen to interfere IR imaging quantitatively, study was carried out both in theory and in experiment. Firstly, based on discrimination distance rule, the equation to calculate the view range of IR imaging under the interference of smokescreen was built from the aspect of radiation contrast, which made the analysis and evaluation of interference effect of smokescreen available from assessing the variation of view range of IR imaging before and after the interference. Secondly, transmissivity of smokescreen to different wavebands was measured in experiment. And then human body was selected as the target to observe. Normalized mutual information was selected as criterion based on correlativity rule and direct observation was used to analyze the interference effect of smokescreen on IR imaging in experiment. The results show that under the action of smokescreen, the apparent contrast between the target and background has dropped to less than 4% of their inherent contrast when the IR imaging system can't satisfy the demand of recognition. The corresponding transmissivity of smokescreen was 55%, and the theoretical calculation was consistent with the experimental analysis.

Key words: interference of smokescreen; radiation contrast; view range; normalized mutual information

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

作者简介: 韩宏伟(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电成像技术方面的研究。Email: powerfire@aliyun.com

0 引言

红外烟雾严重影响红外热成像探测设备的作战性能,是最有效、最直接的对抗红外侦察与制导武器系统的手段,长期以来得到世界各国的重视^[1-2]。红外烟幕可分为热烟幕、冷烟幕和组合烟幕,其对红外热成像的干扰作用主要体现在两个方面:一是烟幕对目标红外辐射产生因吸收、散射而导致的衰减,削弱敌方红外侦察和制导系统中红外热像仪接收目标信号的强度,又称衰减遮蔽型;二是烟幕本身发出更强的红外辐射,覆盖目标及背景的红外辐射,红外热成像设备只能探测到一片模糊的影像,又称辐射遮蔽型^[3-4]。作为红外对抗装备的一种,红外烟幕干扰效果评价是其作战使用的关键^[5]。

文中分别依据作用距离准则和相似度准则^[6],从理论和实验两方面研究烟幕对红外热成像干扰效果的评价问题。首先,以作用距离为指标,以辐射对比度为判据,建立烟幕干扰下的红外热成像视距方程,从而可以通过比较实施干扰前后红外热成像系统的视距变化来分析烟幕的干扰效果,为红外烟幕干扰效果评价提供了一种理论方法。然后,针对某型手持式红外热像仪,以人体为目标,在实验室中利用烟箱和发烟机等设备实际测试烟幕对红外热成像的干扰效果。以归一化互信息为指标,结合直接观察分析干扰效果。由归一化互信息曲线变化和肉眼直接观察所判定的无法识别目标时的图像,其对比度下降程度与由理论分析所得出的结果相符。

1 烟幕干扰下的红外热成像视距方程

要从理论上评估烟幕干扰前后红外热成像系统作用距离的变化,首先应建立红外热成像系统作用距离的预测模型。目前,红外热成像系统对扩展源目标的作用距离通常采用 MRTD 法进行预测^[7]。但该方法是通过计算辐射温差在均匀分散衰减介质中的传递情况来估算红外热成像系统的作用距离,可以用于冷烟幕干扰的情况,却无法预测热烟幕自发热辐射遮蔽目标时热成像系统的视距^[8]。针对这一问题,由于目标探测的清晰程度可由一个对比度参数定量描述^[9-10],文中以辐射对比度为判据建立可以适用于不同类型烟幕干扰下的红外热成像视距方程。

1.1 阈值辐射对比度

在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内辐射对比度的定义为^[11]:

$$C(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \frac{\Delta L(\lambda_1 \sim \lambda_2)}{L_b(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta L(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [L_t(\lambda) - L_b(\lambda)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (1)$$

式中: $L_t(\lambda)$ 和 $L_b(\lambda)$ 分别为目标与背景的光谱辐射亮度; $\Delta L(\lambda)$ 则为两者的光谱辐射亮度差。

不失一般性,不考虑目标与背景对环境的反射,且设目标与背景是漫射灰体,遵守朗伯余弦定律,则:

$$L_i(\lambda) = \frac{\varepsilon_i \cdot M(\lambda, T_i)}{\pi} \quad i=t, b \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_i(i=t, b)$ 为目标与背景的辐射发射率; $M(\lambda, T_i)$ 为与目标或背景同温度的黑体光谱辐射出射度(普朗克公式), $T_i(i=t, b)$ 为目标或背景温度。

将公式(2)代入 $\Delta L(\lambda)$ 的表达式,并设 $\Delta T = T_t - T_b$ 为目标与背景温度差, $\Delta \varepsilon = \varepsilon_t - \varepsilon_b$ 为目标与背景的辐射发射率差,则当 T_t 与 T_b 差别不大时:

$$\Delta L(\lambda) = \frac{1}{\pi} [(\varepsilon_b + \Delta \varepsilon)M(\lambda, T_b + \Delta T) - \varepsilon_b M(\lambda, T_b)] \approx \frac{1}{\pi} \left[\varepsilon_t \Delta T \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} \Big|_{T=T_b} + \Delta \varepsilon M(\lambda, T_b) \right] \quad (3)$$

那么公式(1)可化为:

$$C(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \frac{\Delta T \cdot \varepsilon_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} \Big|_{T=T_b} d\lambda + \Delta \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_b) d\lambda}{\varepsilon_b \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_b) d\lambda} \quad (4)$$

定义 $W_T(T_b) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} \Big|_{T=T_b} d\lambda$, $W_D(T_b) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_b) d\lambda$, 则上式可进一步简化为:

$$C(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \frac{\Delta T \cdot \varepsilon_t W_T(T_b) + \Delta \varepsilon W_D(T_b)}{\varepsilon_b W_D(T_b)} \quad (5)$$

热像仪出厂前通常会测试其静态性能指标 MRTD。在实验室内对红外热成像系统的 MRTD 进行测量时, $\varepsilon_t = \varepsilon_b = 1$, 所以可以由公式(5)得到阈值辐射对比度与 MRTD 之间的换算关系,即:

$$C_T(\lambda_1 \sim \lambda_2, f) = \frac{W_T(T_b)}{W_D(T_b)} \cdot \text{MRTD}(f) \quad (6)$$

1.2 烟幕干扰下的作用距离方程

目标施放红外烟幕干扰红外热像装备时,目标(背景)、烟幕和热像仪之间的关系如图 1 所示。设目标、背景与探测器之间的距离为 R , 在目标与探测器

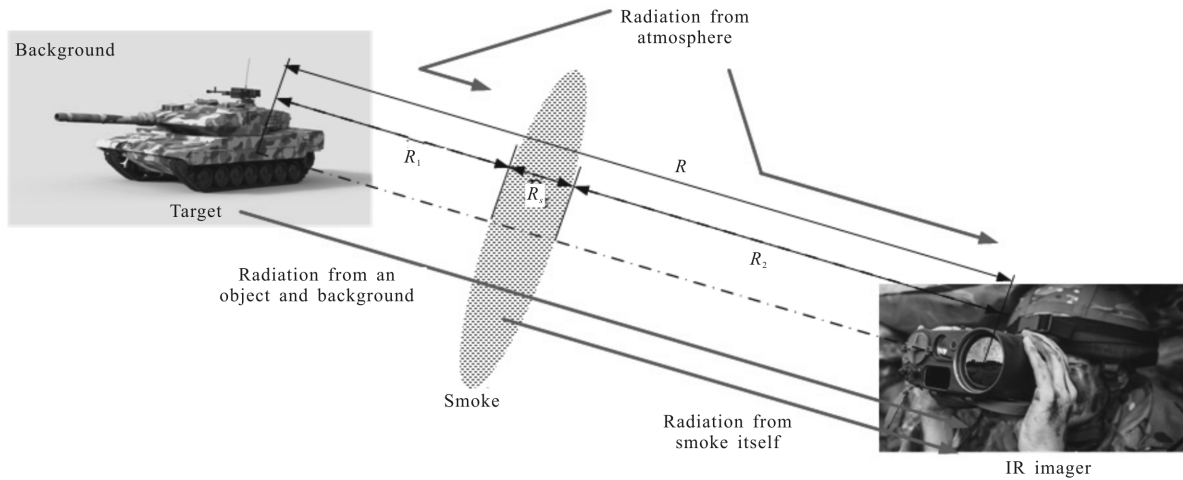


图 1 目标(背景)、烟幕和热像仪之间的位置关系

Fig.1 Relationship of location among target(background), smokescreen and IR imager

的连线上距目标 R_1 处有一厚度为 R_s 的烟幕,该烟幕距探测器的距离为 R_2 。设辐射在 R_1 、 R_s 和 R_2 段的视光谱辐射亮度分别为^[12]:

$$\begin{cases} L'_t(\lambda) = \{ [L_t(\lambda)\tau_{R_1} + L_h(\lambda) \times (1 - \tau_{R_1})] \tau_s + L_s(\lambda) \tau_{R_2} + L_h(\lambda) \times (1 - \tau_{R_2}) \} \\ L'_b(\lambda) = \{ [L_b(\lambda)\tau_{R_1} + L_h(\lambda) \times (1 - \tau_{R_1})] \tau_s + L_s(\lambda) \tau_{R_2} + L_h(\lambda) \times (1 - \tau_{R_2}) \} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $L_h(\lambda)$ 为大气的光谱辐射亮度; $L_s(\lambda)$ 为烟幕的光谱辐射亮度。

在实际情况下, 一般有 $R_2 \gg R_s, R_2 \gg R_1$, 从而有 $R_2 \approx R, R_1 \approx 0$, 于是在上式中有 $\tau_{R_1}(\lambda) = 1, \tau_{R_2} = \tau_R(\lambda)$ 。这样公式(7)简化为:

$$\begin{cases} L'_t(\lambda) = L_t(\lambda)\tau_s\tau_R + L_s(\lambda)\tau_R + L_h(\lambda) \times (1 - \tau_R) \\ L'_b(\lambda) = L_b(\lambda)\tau_s\tau_R + L_s(\lambda)\tau_R + L_h(\lambda) \times (1 - \tau_R) \end{cases} \quad (8)$$

所以, 在烟幕影响下目标与背景之间的表观辐射对比度为 (这里假设各光谱透射比在所考察光谱范围内为常数):

$$C'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [L'_t(\lambda) - L'_b(\lambda)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L'_b(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\tau_s\tau_R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L_t(\lambda) - L_b(\lambda)) d\lambda}{\tau_s\tau_R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\lambda) d\lambda + \tau_R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_s(\lambda) d\lambda + (1 - \tau_R) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_h(\lambda) d\lambda} = \frac{\Delta T \cdot \varepsilon_t W_T(T_b) + \Delta \varepsilon W_D(T_b)}{\varepsilon_b W_D(T_b) + \frac{1}{\tau_s} W_D(T_s) + \frac{(1 - \tau_R)}{\tau_s \tau_R} W_D(T_h)} \quad (9)$$

式中: T_s 与 T_h 分别为烟幕与大气的等效黑体温度。定义

$$K = \frac{1}{1 + \frac{1}{\tau_s \varepsilon_b} \frac{W_D(T_s)}{W_D(T_b)} + \frac{(1 - \tau_R)}{\tau_s \tau_R \varepsilon_b} \frac{W_D(T_h)}{W_D(T_b)}} \quad (10)$$

为辐射对比度传递函数, 则公式(9)可化为:

$$C'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = C(\lambda_1 \sim \lambda_2) \cdot K \quad (11)$$

由公式(10)和(11)可以看出, 大气及烟幕的存在使目标与背景之间的表观辐射对比度低于其固有辐射对比度。当增大红外烟幕的消光能力, 即光谱透射比 τ_s 减小时, 公式(10)的分母变大, 因而目标与背景之间的表观辐射对比度 $C'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 进一步减小; 另一方面, 当增大红外烟幕的自身辐射强度, 即 T_s 增加时, $W_b(T_s)$ 也增加, $C'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 同样会进一步减小。当目标与背景之间的表观辐射对比度低于阈值辐射对比度时, 红外热成像系统便无法探测目标了。

根据公式(6)和(11)得到烟幕干扰下红外热成像的视距方程为:

$$\begin{cases} C(\lambda_1 \sim \lambda_2) \cdot K \geq C_T(\lambda_1 \sim \lambda_2, f) \\ \frac{H}{2n_e R} \geq \Delta \theta = \frac{1}{2f} \end{cases} \quad (12)$$

式中: H 为目标的临界尺寸; n_e 为依据约翰逊准则所确定的与观察等级对应的等效条纹对数。通过上述方程进行烟幕干扰下热成像系统视距估算的基本要求是: 目标与背景的固有辐射对比度在经过大气及烟幕传输到达热成像系统时, 其表观对比度应大于或等于该成像系统对应频率的阈值辐射对比度; 同时目标对成像系统的张角应大于或等于探测水平所

要求的最小视角。

2 烟幕对红外热成像干扰的实验

2.1 实验装置

实验设置如图 2 所示, 利用烟箱进行烟幕对红外成像干扰的实测实验, 发烟机通过烟箱侧壁的小孔以每分钟消耗 1.2 cm³ 油料的速率向烟箱中施放烟幕, 烟幕成分为醇类混合物。

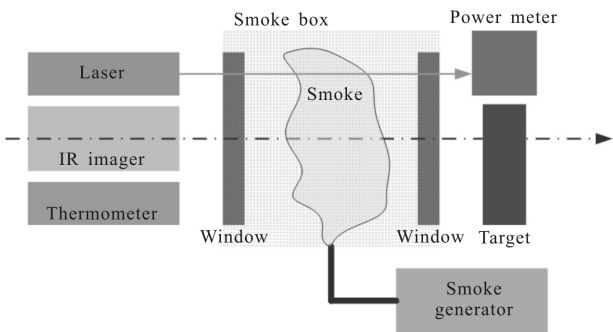


图 2 烟幕干扰红外热像实验示意图

Fig.2 Experimental chart of smokescreen to thermal imaging system

以透过率表征烟幕的特性。半导体激光器和光功率放置在烟箱透过窗口两侧, 以测量 650 nm 波长的透过率。测温仪的型号为 testo885, 用以测量目标与烟幕自身温度(分别为 32.2 °C 与 29.5 °C), 并通过测量高温目标温度随烟幕的变化情况计算 8~14 μm 波段的平均透过率。

某型手持式红外热像仪和目标分别放置在烟箱的两侧, 热像仪透过烟箱上的透明窗口对目标成像。实验中直接以人体作为目标。根据相似度准则, 以归一化互信息作为指标计算受烟幕干扰图像与基准图像之间的相关程度, 从而评价烟幕对红外热成像的干扰效果。归一化互信息的定义如下所示^[13]:

$$NMI(I_1, I_k) = \frac{\sum_i p_i(I_1) \log_2 p_i(I_1) + \sum_i p_i(I_k) \log_2 p_i(I_k)}{\sum_i \sum_j p_{ij}(I_1, I_k) \log_2 p_{ij}(I_1, I_k)} \quad (11)$$

$k=2, 3, \dots, 15$

式中: I_1 为无烟幕时的基准图像; $I_k (k=2, 3, \dots, 15)$ 为随着时间变化不同烟幕浓度下的图像; p_i 为灰度级为 i 的图像的灰度分布概率; $p_{ij}(I_1, I_2)$ 为两幅图像灰度的联合概率分布。

2.2 实验结果

透过率的测量结果如图 3 所示。可以看到, 由于

波长的影响, 该烟幕对可见光的消光能力远大于对长波红外的消光能力。从开始喷射烟幕, 时间仅需 6 s, 650 nm 波长辐射的透过率便下降到 0; 而 8~14 μm 波段辐射的平均透过率则下降比较缓慢, 过后仍然大于 40%。反映了红外热成像相对于可见光成像具有更好的透过烟幕的能力。

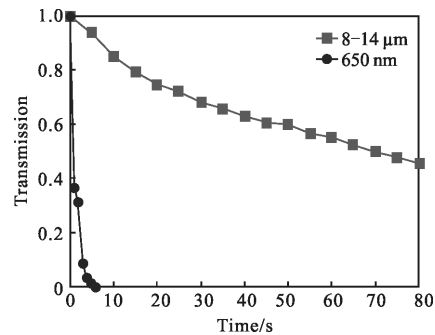


图 3 烟幕对不同波段辐射的透过率

Fig.3 Transmissivity of smokescreen to different wavebands

红外热像仪所采集图像的归一化互信息变化情况如图 4 所示。实验开始前, 首先采集一帧无烟幕时的图像作为基准图像; 然后发烟机开始施放烟幕, 并每隔 5 s 采集一帧图像。实验中一共采集了 15 帧图像。

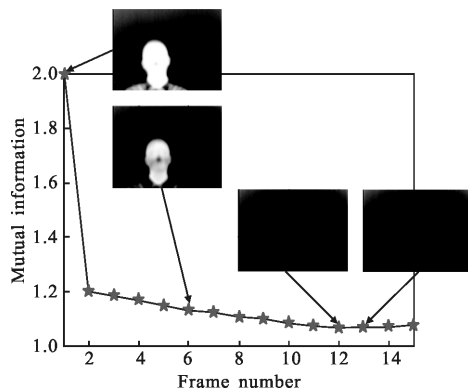


图 4 归一化互信息随时间的变化情况

Fig.4 Variation of normalized mutual information with time

可以看到, 随着时间增加, 烟幕浓度增大, 归一化互信息呈下降趋势, 表明受干扰图像与基准图像之间的相关性消失。其中, 从第 2 帧到第 12 帧, 归一化互信息的变化单一、平滑, 而从第 13 帧开始, 归一化互信息出现抖动。如果比较第 12、13、14 帧图像, 可以看到, 第 12 帧图像中目标仍具有较为完整的轮廓, 而第 13 帧图像中目标已无法辨识, 第 14 帧图像中目标已基本被完全遮盖。通过归一化互信息指标分析和图像

观察,可以认为到 13 帧图像对应的时间点(60 s)时,烟幕浓度达到了干扰发生作用所要求的值。

下面验证仿真模型的合理性。通过查询该型热像仪的操作手册,其 MRTD 值为 0.5 K。由于一般实验室测试时的黑体背景的温度为 300 K,则根据公式(6)可以计算出阈值对比度为 $C_7=0.0076$ 。对于目标与背景的固有辐射对比度,取人体皮肤温度为 310 K,且与背景温差为 3.5 K^[14],人体与背景的辐射发射率分别为 0.99 和 0.85,则根据公式(9)可以计算出 $C=0.2269$ 。因而 $K=0.0336$,即表观辐射对比度要下降为原来的 3.36%,热像仪才无法辨识目标。直接从图像中计算目标与背景的图像对比度,则第 1 帧图像的对比度为 0.8809,第 12 帧为 0.1643,而第 13 帧为 0.0205,也就是说,到第 13 帧无法识别目标时,图像对比度已下降到基准图像对比度的 2.33%,低于 3.36%。这一情况与理论分析是对应的,说明了文中理论的合理性。根据图 3,当红外热像仪无法识别目标时,烟幕在 8~14 μm 波段的平均透过率为 55%。

3 结 论

烟幕是红外对抗的一种重要形式,而其干扰效果分析与评价是其研究框架下的一个重要内容。文中推导了目标辐射传输路径上存在烟幕自身强辐射情况下的热成像视距方程,可以直接以作用距离的变化来分析烟幕对目标遮蔽的效果。实验中利用烟箱和发烟机实际测试烟幕对热成像的干扰效果,通过归一化互信息指标和直接观察确定目标无法识别时的帧序号,其与基准图像的对比度变化情况与依据视距方程所推导的辐射对比度变化情况相符,即当目标与背景的表观对比度下降到其固有对比度的 4%以下时(对应透过率为 55%),红外热成像系统将无法达到识别的观察等级。文中对烟幕技术的研究具有一定的参考和借鉴价值。

参考文献:

[1] Yang Dongying, Qiu Xuanbing, Li Chuanliang, et al. A high accuracy Mie scattering coefficient algorithm for interfacing smog optic-guided weapon [J]. *Fire Control & Command Control*, 2017, 42(8): 56–60. (in Chinese)

[2] Wang Qi, Zhang Hongbo. Test design and evaluation method of infrared detector smoke interference [J]. *Journal of Naval*

Aeronautical and Astronautical University, 2017, 32 (1): 138–142. (in Chinese)

[3] Zhang Dongmei, Zhao Shenghong, Zhu Chunting, et al. Study on the stealth smoke for applications to infrared stealthy technology[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(10): 609–611. (in Chinese)

[4] Ding Guozhen, Zhang Zhanyue, Zhou Siyin, et al. Study on diffusion mechanism and attenuation performance of space smoke-screen [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(11): 914–919. (in Chinese)

[5] Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Fan Xiaoguang, et al. Research of an effectiveness evaluation method of infrared countermeasure process [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304008. (in Chinese)

[6] Gao Wei, He Wei. Evaluation rules of smokescreen jamming effectiveness on electro-optical observation and aiming devices[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(S1): 270–273. (in Chinese)

[7] He Heng, Bai Tingzhu. Calculation error analysis of the distance equation for infrared imaging system [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 713–718. (in Chinese)

[8] Zhou Zunning, Pan Gongpei, Guan Hua, et al. Research on interference to target detection of IR imaging by smoke [J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(3): 348–352. (in Chinese)

[9] Zhang Jingwei, Wu Pengfei, Rao Ruizhong. Infrared atmospheric visibility: definition, algorithm and analysis of key factors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 26(3): 348–352. (in Chinese)

[10] Jia Lintong, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, et al. Survey on airborne surface-type infrared decoy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0904005. (in Chinese)

[11] Cai Yi, Liu Yanli, Dai Congming, et al. Simulation analysis of target and background contrast in condition of cirrus atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (8): 0801001. (in Chinese)

[12] Shi Jiaming, Lu Yuan. Principle of Infrared Countermeasure [M]. Beijing: People's Liberation Army Press, 2002. (in Chinese)

[13] Han Yusheng, Zhou Pucheng, Qiao Yanli, et al. Adaptive polarization difference imaging approach based on minimum mutual information [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 487–491. (in Chinese)

[14] Wang Juan. Calculation of the view range of infrared imaging system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004. (in Chinese)