

空天红外探测系统对无人机集群探测能力分析

谢家豪*, 黄树彩, 韦道知, 张墨宇

空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051

摘要 以无人机(UAV)集群为研究对象,针对空天红外探测系统对UAV集群的探测能力进行分析。将UAV集群飞行过程划分为三个阶段并对其红外辐射特性和成像特性进行建模分析;对于探测距离模型建模过程中对目标成像的弥散特性考虑较少的情况,建立了基于弥散系数的噪声等效通量密度(NEFD)点目标探测距离模型。为验证所提出的探测距离模型的有效性,采用不同建模方法、不同弥散系数对比的方法分析探测距离随目标的信噪比(SNR)和速度的变化情况。仿真结果表明所提模型的探测距离优于其他建模方法,探测距离随着目标飞行速度的增加而增大,随着信噪比的增加而增大,同时弥散系数随着探测距离的变化而变化,所建立的弥散系数求解方法得到的探测距离优于其他方法。

关键词 测量; 无人机集群; 探测能力; 红外探测系统; 探测距离; 弥散现象; 噪声等效通量密度

中图分类号 TN215

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1812002

Detectability Analysis of Air-Space Infrared Detection System for UAV Swarm

Xie Jiahao*, Huang Shucui, Wei Daozhi, Zhang Zhaoyu

Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, Shaanxi, China

Abstract Taking unmanned aerial vehicle (UAV) swarm as an example, this paper analyzes the detectability of an air-space infrared detection system for the UAV swarm. Firstly, the UAV swarm flight process is divided into three phases, and its infrared radiation characteristics and imaging characteristics are modeled and analyzed in detail. Secondly, as dispersion characteristics of target imaging in the detection range modeling are considered inadequately, a noise equivalent flux density (NEFD) point target detection range model based on dispersion coefficient is established. In the meantime, in order to verify the effectiveness of the proposed model, different modeling methods and dispersion coefficient comparison methods are used to analyze the change of detection range with signal noise ratio (SNR) and the swarm speed. Simulation results show that the detection range of the proposed model is better than that of other models, and the detection range increases as the swarm flight speed and SNR increase. Furthermore, the dispersion coefficient varies with the detection range. The detection range obtained by the dispersion coefficient solution is superior to that obtained by other methods.

Key words measurement; unmanned aerial vehicle swarm; detectability; infrared detection system; detection range; dispersion phenomenon; noise equivalent flux density

1 引言

随着人工智能在武器装备研发领域中的广泛应用,无人机(UAV)系统的技术性能也在不断提升,并且近年来又经历实战的洗礼,逐步实现由人为控制向自主攻防、人机协同作战发展。美国国防部在《无人机系统路线图2005—2030》中指出,到2025年UAV集群将具备战场认知能力,能够完全实现自组织作战^[1]。UAV集群作为一种新型作战力量成为未来战场的主

要作战样式,是指具有互联互通功能的多架UAV为执行某一作战任务,按照一定的指挥控制规则,彼此间协同配合达到作战目的的集合体^[2]。

空天红外探测系统对UAV集群的探测能力分析主要是指在充分分析UAV集群的目标的红外特性和成像特性的基础上,用现有空天红外探测系统的探测性能指标如红外探测系统的探测距离、信噪比(SNR)、检测概率和虚警概率^[3-4]等来表征探测系统对UAV集群的探测能力。对UAV集群的可探测性分析

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2021-12-28; 录用日期: 2022-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(61703424)

通信作者: *18222517021@163.com

是一个复杂的问题, 研究内容可以为后续探测系统的构建与及时调整作战计划提供坚实的理论基础。

目前采用红外探测技术对 UAV 集群探测的研究有很多, 但是主要集中在定性分析, 对于 UAV 集群的红外可探测性的定量建模研究较少。Liu 等^[5-6]认为当前主要的探测方法有基于主动探测的雷达探测技术、无线电探测技术和基于被动探测的光电探测技术, 同时针对当前的探测方法进行对比分析, 总结出每种探测方法的优缺点, 并给出了反 UAV 的关键技术, 但是这些研究主要停留在定性分析层面, 并没有进行定量分析; Guvenc 等^[7]分析总结了当前研究对 UAV 集群探测的难点, 并提出对 UAV 集群进行移动探测和融合探测的新方法, 但是并没有针对目标的可探测性进行深入建模分析; Opromolla 等^[8]采用多维探测手段探测 UAV 集群, 将红外和可见光探测方法进行协同和融合, 但是他们只是提出了构想, 缺乏数学理论的支撑; Wang 等^[9]主要运用红外探测技术实现对 UAV 集群的探测, 对 UAV 目标进行红外特性建模分析, 提出一种新的探测方法, 但是该方法并未充分考虑 UAV 集群作战全流程, 仅针对 UAV 本体特性进行研究。

当前研究人员针对红外探测系统探测距离的研究较多, 并提出了多种改进方法, 如巢时宇等^[10]建立了红外系统探测距离模型, 但是该模型并没有考虑背景辐射的影响; 牟达和韩红霞^[11]建立了基于噪声等效温差 (NETD) 的探测距离模型, 但是并没有考虑目标成像的弥散现象, 而且 NETD 是实验室测定的理想数值, 并未考虑实际情况。毛峡等^[12]提出一种基于噪声等效通量密度 (NEFD) 的探测距离模型, 但是该模型并没有考虑目标成像的弥散特性。

针对以上问题, 本文首先将 UAV 集群飞行过程按作战任务划分为三个阶段, 通过建模分析 UAV 集群的红外辐射特性和目标成像特性, 并在考虑目标成像的弥散特性以及目标和背景辐射强度差异的基础上, 提出基于弥散系数的 NEFD 探测距离模型, 最后通过仿真验证模型的有效性。

2 UAV 集群飞行特性分析

本文根据典型 UAV 集群作战流程^[13]将 UAV 集群目标飞行全过程分为挂载起飞阶段、编队飞行阶段和分群攻击三个阶段。具体飞行过程如图 1 所示。

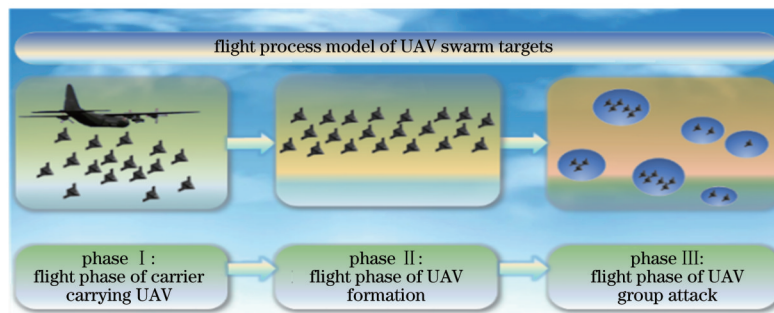


图 1 UAV 集群飞行全过程模型

Fig. 1 Flight full process model of UAV swarm targets

1) 挂载起飞阶段

挂载起飞阶段主要是指空中载机挂载 UAV 飞行的阶段。这个阶段的主要任务是完成任务层面的工作。

2) 编队飞行阶段

编队飞行阶段主要是指空中载机到达指定位置释放 UAV 后, UAV 集群按照一定的编队规则沿着起始规划的航路进行编队飞行的过程。这个过程中要完成战场侦察任务和通信干扰任务。

3) 分群攻击阶段

分群攻击阶段主要是指 UAV 集群完成战场侦察和通信干扰任务后, 我方指控中心对敌方武器配置即目标位置信息进行融合处理确认后, 首先确认打击目标的区域, 进行作战前的准备, 主要对航路和任务参数进行调整, 再次确认作战方式后执行分群攻击任务, 完成对敌方目标的压制性和毁灭性打击。

根据 UAV 集群飞行全过程, 针对不同飞行阶段研究 UAV 集群可探测性。在挂载起飞阶段, UAV 挂载在载机上完成飞行任务, 从探测角度来看, UAV 载

机作为主要探测目标进行探测, 主要针对其红外辐射特性进行研究, 并以此为依据进行拦截和打击决策。

在编队飞行阶段, UAV 集群呈编队样式完成作战任务, 在此阶段可以将 UAV 编队看作一个编队整体进行研究; 在分群攻击阶段, UAV 集群编队被分为若干子群, 可以将每个子群看成一个整体进行研究。因此, 从探测的角度来看这两个阶段, 主要考虑 UAV 集群的红外辐射特性和目标成像特性, 并根据 UAV 集群目标的成像特性建立空天红外探测系统用于进一步分析目标的可探测性, 分析 UAV 集群编队阶段 UAV 集群的可探测性可以为后续 UAV 集群目标跟踪与拦截提供基础。

3 UAV 集群红外可探测性建模分析

3.1 UAV 集群红外辐射特性

UAV 的红外辐射一般分为蒙皮红外辐射、喷口红外辐射和尾焰辐射三种。本文所指的 UAV 集群为大量相同种类的 UAV 的集合体, 同时由第 2 节分析可知, 在编队飞行阶段, UAV 集群呈编队整体飞行, 可将

其看作一个整体进行研究。针对一个 UAV 集群编队整体,其蒙皮红外辐射、喷口红外辐射和尾焰辐射三种不同的辐射计算方式为单架 UAV 辐射值的叠加,下面分别进行建模分析。

3.1.1 蒙皮红外辐射建模分析

将 UAV 看作灰体,根据黑体辐射定律,其光谱辐射亮度为

$$L_1(\lambda, T) = \frac{\varepsilon_1 M(\lambda, T)}{\pi} = \frac{2\varepsilon_1 \pi h c^2}{\pi \lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left[\frac{ch}{\lambda k T}\right] - 1}, \quad (1)$$

式中: ε_1 为蒙皮光谱发射率,通常取 0.6; $M(\lambda, T)$ 为光谱辐射出射度; λ 为波长; T 为蒙皮温度; h 为普朗克常量; c 为光速; k 为玻尔兹曼常数。

假设探测波段为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$,则在对应波段对式(1)进行积分,得到蒙皮的辐射亮度为

$$L_1 = \frac{\varepsilon_1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T) d\lambda. \quad (2)$$

蒙皮温度的计算公式为

$$T = T_{\text{environment}} (1 + 0.164M^2), \quad (3)$$

式中: $T_{\text{environment}}$ 为环境温度,单位为 K; M 为载机飞行速度,单位为 Ma。

UAV 的蒙皮的辐射强度为

$$I_1 = L_1 A_1 \cos \theta_1, \quad (4)$$

式中: A_1 为 UAV 蒙皮红外辐射面积; θ_1 为 UAV 蒙皮外法线与探测视线的夹角。

3.1.2 喷口红外辐射建模分析

为简化运算,将喷口看作内腔各点温度均匀且呈漫反射的灰体,则在探测波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内,喷口的辐射亮度为

$$L_2 = \frac{\varepsilon_2}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left[\frac{ch}{\lambda k T_n}\right] - 1} d\lambda, \quad (5)$$

式中: ε_2 为喷口光谱发射率,通常取 0.9; T_n 为喷口温度,在非加力状态下为 850~900 K。

喷口的辐射强度为

$$I_2 = L_2 A_2 \cos \theta_2, \quad (6)$$

式中: A_2 为 UAV 喷口红外辐射面积; θ_2 为 UAV 喷口外法线与探测视线的夹角。

3.1.3 尾焰辐射建模分析

发动机尾焰的主要成分是水、二氧化碳和一些一氧化碳气体,对尾焰辐射能量产生影响的是水和二氧化碳,尾焰在 2.7 μm 和 4.3 μm 有较强的辐射,如图 2 所示。同时,大气中也含有水和二氧化碳,辐射在大气中传输时,在 2.7 μm 和 4.3 μm 附近容易出现吸收衰减,但是由于尾焰温度大于大气温度,在上述波长处,尾焰辐射的谱带宽度比大气吸收的谱带宽度宽。

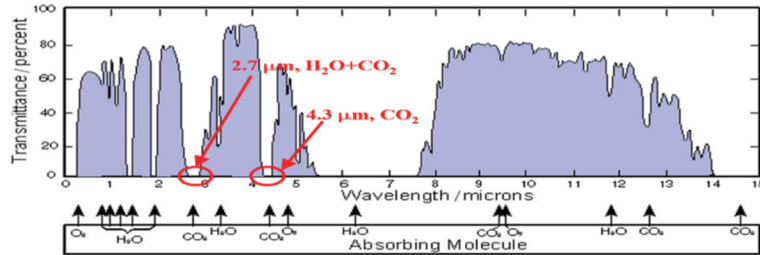


图 2 中红外波段大气透射谱^[14]

Fig. 2 Atmospheric transmission spectrum in mid infrared band^[14]

通常基于 C-G 谱带模型^[15-16]计算尾焰的红外辐射,运用该模型计算时将尾焰中的各种气体根据视线方向不同分成若干层,分别进行计算,最后求和。具体计算公式如下:

$$L_3 = \sum_m \sum_{\omega} L_{m,\omega} \Delta\omega, \quad (7)$$

式中: L_3 为尾焰辐射强度; m 为气体层数; ω 为波数; $L_{m,\omega}$ 为波数为 ω 的第 m 层的光谱辐射亮度; $\Delta\omega$ 为波数变化量。

尾焰的辐射强度为

$$I_3 = L_3 A_3, \quad (8)$$

式中: A_3 为尾焰红外辐射面积。

假设 UAV 集群中有 s 架 UAV,则 UAV 集群的总红外辐射强度为

$$I = s(I_1 + I_2 + I_3). \quad (9)$$

3.2 UAV 集群红外成像特性

3.2.1 目标成像大小分析

目标在焦平面的成像大小 D 主要取决于目标到探测器之间的距离 R 、光学系统有效焦距 f 和目标的实际尺寸 r ,模型如图 3 所示。

由图 3 可以得到

$$\tan\left(\frac{n}{2}\varphi\right) = \frac{r}{R}, \quad (10)$$

式中: φ 为瞬时视场角, $\varphi = D/f$; n 为目标所占像素个数。

当 $n=1$ 时,即目标仅占 1 个像素为成像所需的最小像素数,目标到探测器之间的距离 R 即为临界距离 R_0 ,即

$$R_0 = \frac{r}{\tan\left(\frac{1}{2}\varphi\right)}. \quad (11)$$

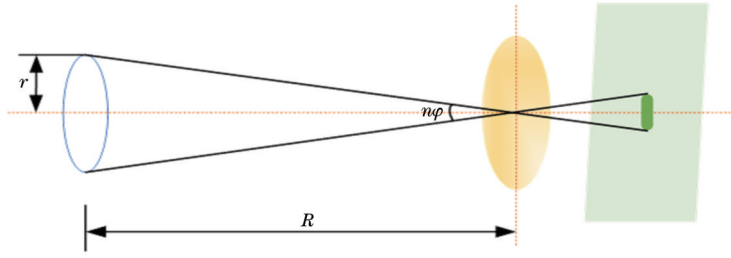


图 3 目标成像模型

Fig. 3 Target imaging model

当 $R \geq R_0$ 时, 目标成像为点目标, 在分析探测性能时需考虑成像的弥散现象。

假设 UAV 载机为某型运载机, 其实际尺寸 $r = 3.14 \text{ m}$, 取焦距 $f = 300 \text{ mm}$, $D = 30 \mu\text{m}$, 即可以得到临界距离 $R_0 = 62.8 \text{ km}$, 向上取整为 63 km 。当研究 UAV 集群时, 将任意一个集群看成一个整体, 其等效尺寸 $r = 2 \text{ m}$, 在相同探测条件下, 其临界距离应小于 63 km , 而红外探测器对目标的探测距离一般远大于 63 km 。以天基卫星为例, 部署高度为 300 km , 故可以将 UAV 集群目标按照点目标进行计算, 即其成像尺寸主要由像弥散决定。

3.2.2 点目标成像弥散现象分析

由于实际中对 UAV 集群目标进行探测的过程中使用的光学系统并非理想光学系统, 即点目标成像不再是理想的几何点, 而是扩散的弥散像斑。对于这种响应, 可以用二维高斯点扩展函数 (PSF) 来近似描述, 像平面任意位置的幅度响应表达式为

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\text{psf}}^2} \exp\left[-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{2\sigma_{\text{psf}}^2}\right], \quad (12)$$

式中: (x_i, y_i) 为像平面的位置坐标; σ_{psf} 为标准差, 取值由传感器焦距比数和探测波段决定。

成像点的弥散现象可以用弥散系数 $k'^{[17]}$ 来表示:

$$k' = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_s^2}, \quad (13)$$

式中: σ_i 为目标等效直径对探测器靶面张角的均方根值; σ_s 为实际成像点的弥散斑对红外探测系统张角的均方根值。 σ_i 和 σ_s 的求解公式如下:

$$\sigma_i = \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{S_i}}{R} \cdot \frac{180 \times 3600}{\pi}, \quad (14)$$

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_i^2 + \sum_{i=1}^6 \sigma_i^2}, \quad (15)$$

式中: S_i 为目标的投影面积; $\sigma_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为探测器及大气引起弥散现象的均方根值^[18]。

由式 (13)~(15) 分析可得, 弥散系数 k 并不是确定值, 而且弥散系数 k 随着探测距离 R 的增大而减小, 随着目标的投影面积 S_i 的二次方根的增大而增大。后续在研究红外探测系统对 UAV 集群的距离模型时, 应考虑弥散系数变化带来的影响。

3.3 红外探测器探测 UAV 集群探测距离模型构建

红外探测系统的探测距离是指当红外成像系统接

收的红外辐射刚好能够满足系统的阈值 SNR 时的距离^[19]。由上述分析可知 UAV 集群目标成像为点目标, 且 UAV 集群目标成像主要由弥散决定, 因此 UAV 集群目标像元接收的辐射由 UAV 集群目标的辐射、背景辐射和路径辐射组成。

背景像元接收的辐射由背景辐射和路径辐射组成, 即

$$P_b = L_b A_d \frac{A_0}{f^2} \tau_a \tau_o + P_p, \quad (16)$$

$$P_p = \frac{A_0}{R^2} \tau_o A_i L_p, \quad (17)$$

式中: L_b 为背景辐射亮度; P_p 为路径辐射亮度; A_d 为探测器面积; A_i 为目标在视线方向的投影面积; $A_0 = \pi D_o^2 / 4$ 为光学系统的入瞳面积, D_o 为光学系统的入瞳直径; τ_a 为大气透过率; τ_o 为光学系统的透过率。

假设目标辐射强度为 L_t , 则 N_t 个目标的辐射强度为 $N_t L_t$, 目标的弥散系数为 k , 目标像元接收的辐射功率为

$$P_t = \left[\frac{A_i k L_t}{N_t} + \frac{(N_t - 1) A_i k L_t}{N_t} + \left(\frac{A_d R^2}{f^2} - A_i \right) L_b \right] \frac{A_0}{R^2} \tau_a \tau_o + P_p, \quad (18)$$

则目标像元与背景像元上的辐射功率之差为

$$\Delta P = P_t - P_b = \frac{k L_t - L_b}{N_t} \cdot \frac{A_i A_0}{R^2} \tau_a \tau_o, \quad (19)$$

对应的系统入瞳的辐照度差 ΔE 为

$$\Delta E = \frac{\Delta P}{A_o \tau_o}. \quad (20)$$

系统的噪声等效幅度为

$$N_{\text{EFD}} = \frac{(A_d \Delta f)^{1/2}}{A_o \tau_o D^*}, \quad (21)$$

式中: Δf 为等效噪声带宽; D^* 为星探测度。

信噪比 R_{SNR} 由光学系统入瞳的辐照度差 ΔE 和系统的噪声等效幅度 N_{EFD} 的比值决定, 即

$$R_{\text{SNR}} = \frac{\Delta E}{N_{\text{EFD}}} = \frac{V_n}{V_s}, \quad (22)$$

式中: V_s 为外界输入信号; V_n 为探测器的噪声均方根值。

联立式 (13)~(15) 以及式 (19)~(21), 并将信号

衰减系数 δ 代入式 (22), 可得到探测距离 R 为

$$R = \left[\frac{\delta (\sigma_t^2 L_t - \sigma_s^2 L_b) A_t A_0 \tau_a \tau_0 D^*}{\sigma_s^2 N_t (A_d \Delta f)^{1/2} (V_s/V_n)} \right]^{1/2}. \quad (23)$$

4 仿 真

4.1 UAV 集群目标红外辐射特性仿真

UAV 的尺寸参数为: UAV 机长为 2.0 m, 翼宽度为 2.6 m, 翼面积为 2.5 m², 飞行速度为 0.4 Ma, 机身半径为 0.5 m, 飞行高度为 3~12 km, 发动机状态处于非加力状态, 环境温度为 288 K。

下面分别对 UAV 集群的蒙皮光谱辐射强度、喷

口红外辐射强度、尾焰辐射强度和总红外辐射强度进行仿真, 结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出: UAV 集群的蒙皮辐射在 8~12 μm 波段具有较好的辐射特性; 对于飞机喷口而言, 其主要的辐射峰值在 8 μm 之前的谱段, 即主要分布在中波波段, 5~8 μm 是其强谱段; 但是对于喷口的辐射而言, 其数量级远小于蒙皮的辐射, 而且由于受喷口方向的影响, 在头向观测时无法探测到喷口的红外辐射强度; 尾焰的辐射在 2.7 μm 、4.3 μm 和 5~8 μm 三个波段, 但是在 4~6 μm 波段具有较高的辐射强度。从整体的仿真效果来看, UAV 集群的蒙皮表面辐射和尾焰辐射对其红外特性影响最大。

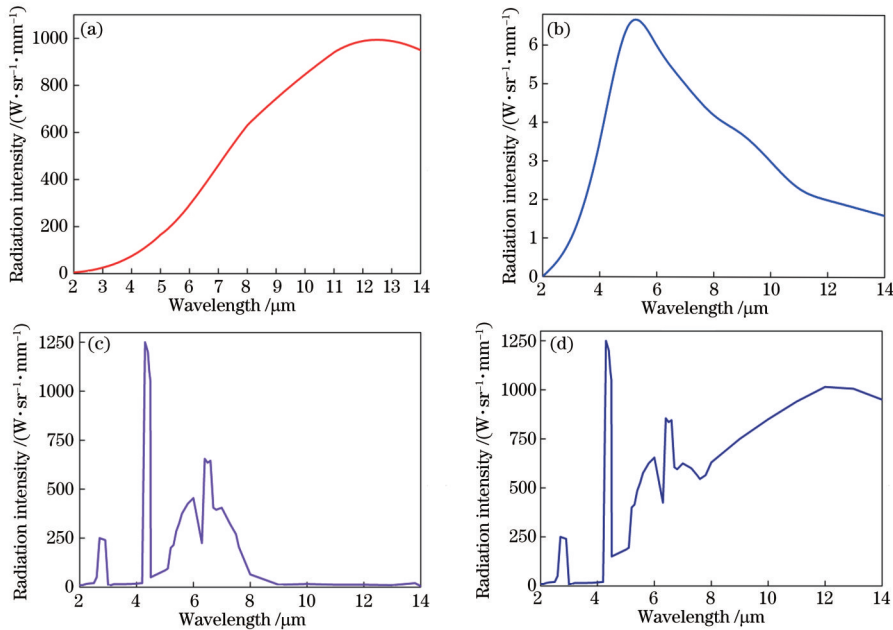


图 4 UAV 集群目标的红外辐射特性。(a) 蒙皮光谱辐射强度仿真图; (b) 喷口红外辐射强度仿真图; (c) 尾焰辐射强度仿真图; (d) 总红外辐射强度仿真图

Fig. 4 Infrared radiation characteristics of UAV swarm. (a) Simulation diagram of skin spectral radiation intensity; (b) simulation diagram of infrared radiation intensity of nozzle; (c) simulation diagram of tail flame radiation intensity; (d) simulation diagram of total infrared radiation intensity

4.2 UAV 集群目标成像特性仿真

4.2.1 单架 UAV 目标成像特性仿真

图 5 给出利用第 4.1 节 UAV 参数在天空背景和地物背景下得到的红外图像及其对应的三维图像。红外探测器参数如下: 探测波谱范围为 3~5 μm , 分辨率为 256 pixel \times 256 pixel, 最大拍摄频率为 100 Hz, 视场角为 3° \times 3°。

图 5 从目标数量、背景复杂度、目标之间有无交叉和目标飞行距离远近 4 种情况分别对目标的成像特性进行了详细仿真分析。

从图 5(a1)、(a2) 和图 5(b1)、(b2) 中目标的红外及三维图像中可以看出: 背景区域分布较为均匀, 目标的强度高于背景强度, 且背景温度和目标表面温度相差不大, 目标不存在明显的发热位置, 导致目标区域的灰度分布类似柱形。从图 5(c1)、(c2) 和图 5(d1)、

(d2) 中目标的红外及三维图像中可以看出: 背景复杂度对目标的红外图像影响较大, 在复杂背景下, UAV 目标不具有强热源, 导致背景和目標混在一起、不易分辨, 同时存在背景灰度强度大于目标强度的情况, 目标的灰度分布类似柱形。从图 5(e1)、(e2) 和图 5(f1)、(f2) 中目标的红外及三维图像可以看出: 目标的灰度强度分布类似为柱形, 但是目标存在交叉的情况, 在图像上不容易分辨出目标个数, 极易将其看成一个目标进行处理。从图 5(g1)、(g2) 和图 5(h1)、(h2) 中目标的红外及三维图像中可以看出: 在近距离飞行时目标的灰度强度分布类似为柱形, 同时目标的轮廓较为清晰, 在远距离飞行时目标轮廓较为模糊, 目标的强度低于背景的背景强度, 目标所占像素较少, 但是灰度强度分布仍类似为柱形。

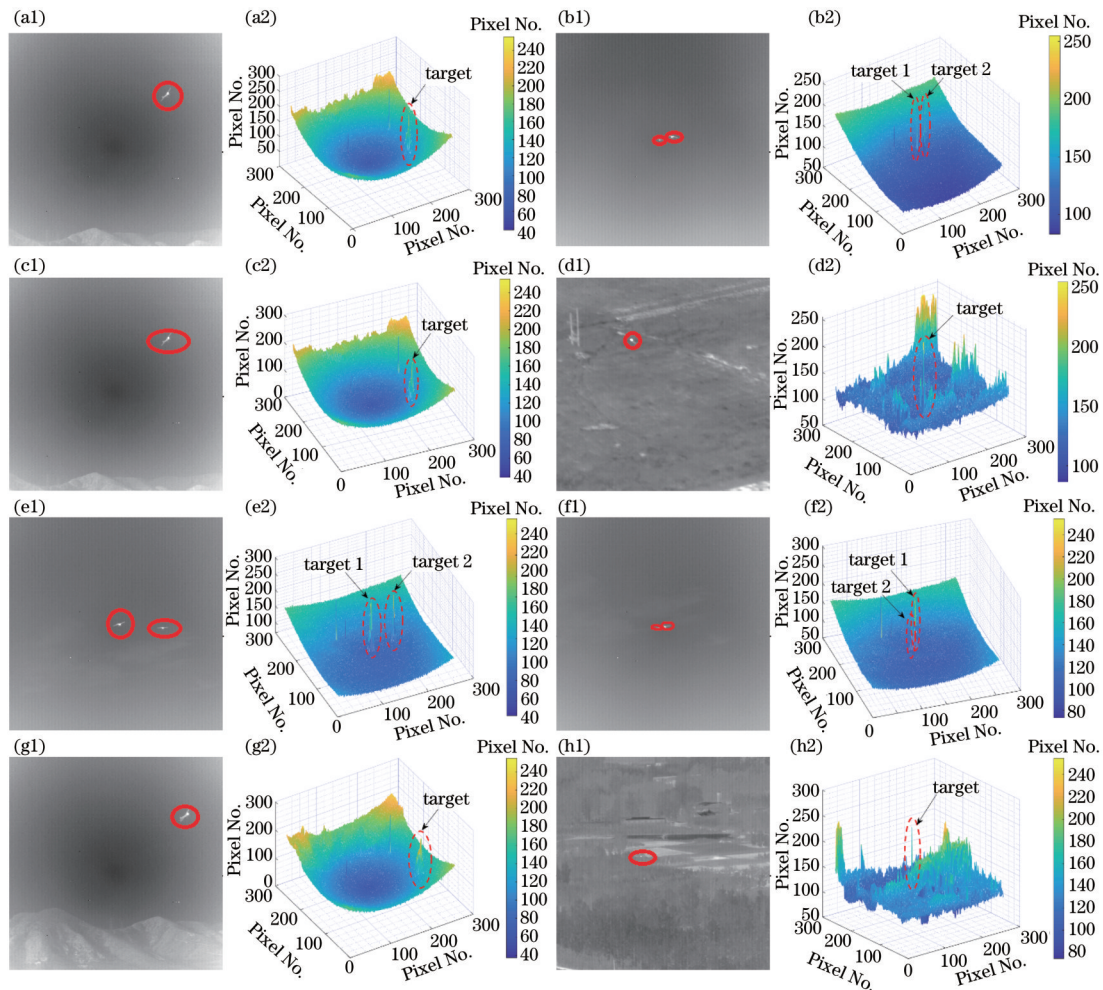


图5 目标红外图像及三维图像。(a1)(a2)单目标;(b1)(b2)多目标;(c1)(c2)单一背景;(d1)(d2)复杂背景;(e1)(e2)目标无交叉;(f1)(f2)目标有交叉;(g1)(g2)目标飞行距离较近;(h1)(h2)目标飞行距离较远

Fig. 5 Target infrared images and three-dimensional images. (a1)(a2) Single target; (b1)(b2) multi targets; (c1)(c2) single background; (d1)(d2) complex background; (e1)(e2) no target crossing; (f1)(f2) target crossing; (g1)(g2) target flying for small distance; (h1)(h2) target flying for large distance

4.2.2 UAV 集群目标成像特性仿真

图6给出UAV集群在编队飞行和分群攻击阶段的红外图像及其对应的三维图像。UAV参数和红外探测器参数同上。

从图6(a1)、(a2)和图6(b1)、(b2)中UAV集群编队飞行阶段和分群攻击阶段的红外及三维图像中可以看出:集群UAV的成像特点与单架UAV成像特点类似,背景温度和目标表面温度相差不大,且目标不存在明显的发热位置,导致目标的灰度强度分布类似于柱形;同时由于目标成像点像素较小,不容易分辨出目标个数,这为后续的检测和跟踪带来了一定的困难。

4.2.3 UAV 集群目标成像弥散现象仿真

对于UAV集群目标,像平面能量响应为各个UAV目标的像元响应的线性叠加。在参考文献[18-20]的基础上,本文取 $\sigma_{\text{psf}} = 0.5$ pixel,即当目标落在像平面的像元中心位置时,约98%的能量将扩散至 3×3 像素区域,即扩散半径为 $3\sigma_{\text{psf}}$ 。图7给出了当取 $\sigma_{\text{psf}} = 0.5$ pixel时,不同坐标下的目标扩散形态。

从图7中可以看出,目标在像平面上的投影位置不一定在像元中心位置,导致目标扩散形态各异。在坐标(0,0)处,目标落在像平面的像元中心位置,目标能量主要集中在主像元中;在坐标(0.5,0.5)处,目标落在像平面的像元边缘附近,目标的能量分布在多个像元内。

图8给出了 σ_{psf} 取不同值时目标的像平面能量分布。从图8中可以看出,随着 σ_{psf} 取值的增大,主像元的能量占比变小,此时目标的弥散程度进一步增强,导致对目标的检测变得十分困难。

4.3 红外探测系统的探测距离仿真

4.3.1 仿真参数设置

为进一步验证仿红外探测系统探测距离模型的合理性和有效性,结合参考文献[14,19],本文选取的仿真参数如表1所示。用MODTRAN4.0软件仿真大气透过率,仿真条件为:1976美国标准大气模型、乡村类型气溶胶模型、标准卷云模式,云高度为10.0 km,云厚度为1.5 km。图9给出了不同高度的大气透过率。

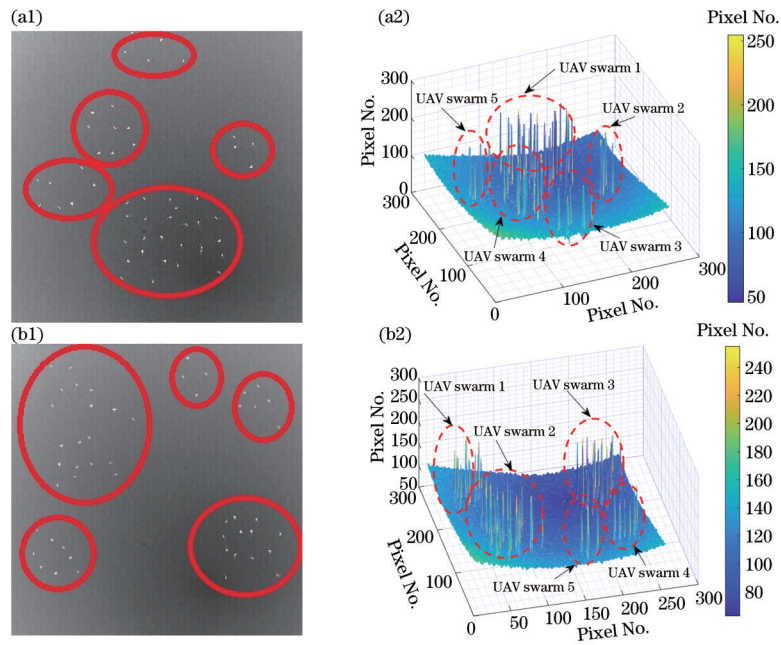


图 6 UAV 集群红外图像及三维图像。(a1)(a2)编队飞行阶段;(b1)(b2)分群攻击阶段

Fig. 6 UAV swarm infrared images and three-dimensional images. (a1)(a2) Phase of formation flight; (b1)(b2) phase of group attack

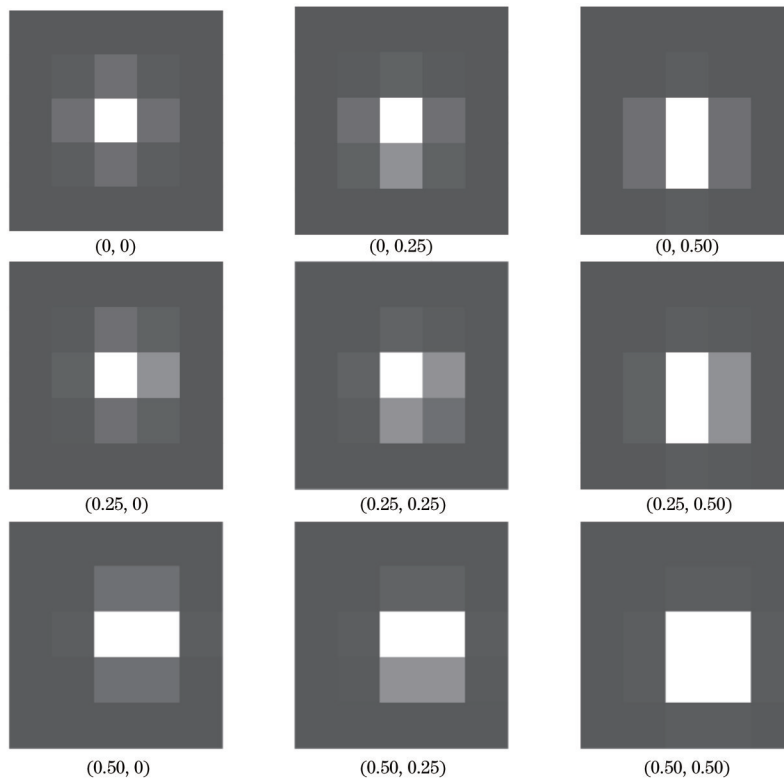


图 7 不同坐标下的目标扩散形态

Fig. 7 Target diffusion patterns under different coordinates

4.3.2 不同模型下的探测距离变化仿真

图 10 采取对比实验的方式将传统 Hudson 探测距离模型^[10]、基于 NETD 的探测距离模型^[11]与本文提出的基于弥散系数的 NEFD 探测距离模型进行对比,分析不同模型下的红外系统探测距离随 R_{SNR} 的变化曲线和随 UAV 集群速度变化的曲线。

从图 10(a)中可以看出,不同模型下得到的探测距离随 R_{SNR} 的变化趋势相同,即 R_{SNR} 越大,探测距离越大,同时也可以看出:三种模型求解得到的探测距离中,传统 Hudson 探测距离模型和基于 NETD 的探测距离模型得到的结果相差不大,而基于弥散系数的 NEFD 探测距离模型的探测距离大于其他两种模型。

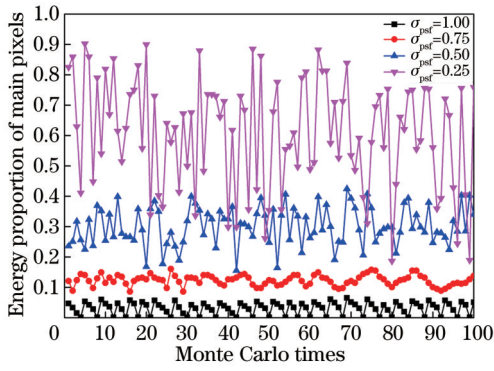


图 8 目标像平面能量分布曲线

Fig. 8 Image plane energy distribution of target

从图 10(b)中可以看出,不同模型下得到的探测距离随 UAV 载机和 UAV 集群飞行速度的变化曲线趋势相同,即飞行速度越大,探测距离越远;这是由于:随着飞行速度的增大,探测器的驻点热流密度增大,导致目标红外辐射增强,进而使得探测距离变大。同时也可以看出三种模型求解得到的探测距离中,传统 Hudson 探测距离模型和基于 NETD 的探测距离模型得到的结果相差不大,而基于弥散系数的 NEFD 探测距离模型的探测距离大于其他两种模型。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Band / μm	3-5
Temperature /K	288
$A_d / (\mu\text{m} \times \mu\text{m})$	30×30
f / cm	15
δ	3
$\Delta f / \text{Hz}$	100
$D^+ / (\text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1})$	3×10^9
$L_b / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	1.45×10^{-4}
τ_0	0.7
A_i / m^2	0.0700
A_o / m^2	0.0242

4.3.3 不同弥散系数下的探测距离变化仿真

图 11 采取对比实验的方式将不同弥散系数下的红外系统的探测距离随 R_{SNR} 的变化和随 UAV 集群速度的变化。图 11 中三条曲线分别对应文献[12]、文献[13]和本文提出的弥散系数求解方法。

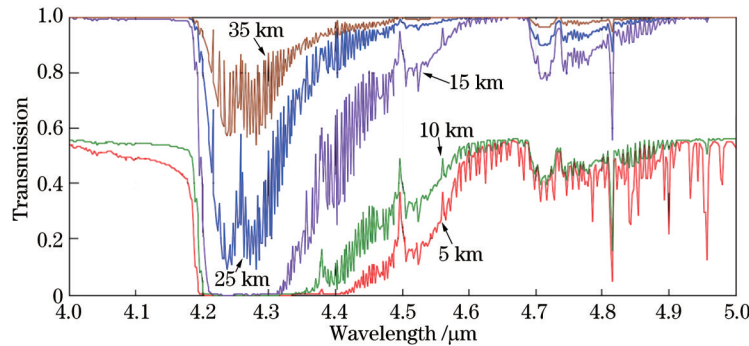


图 9 不同高度下的大气透过率

Fig. 9 Transmission under different height

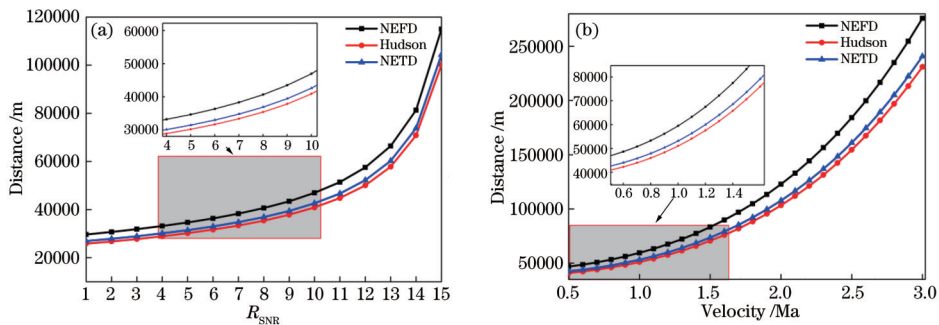


图 10 不同模型下的探测距离变化。(a)不同模型下的探测距离随 R_{SNR} 的变化曲线;(b)不同模型下的探测距离随 UAV 集群速度的变化曲线

Fig. 10 Variation of detection distance under different models. (a) Variation of detection distance with R_{SNR} under different models; (b) variation of detection distance with UAV swarm speed under different models

从图 11 中可以看出:不同弥散系数下的红外探测器的探测距离不同,弥散系数越小,探测距离越小。同

时也能看出,采用本文提出的弥散系数计算方法后探测距离变小,而文献[12]并没有考虑弥散现象对红外

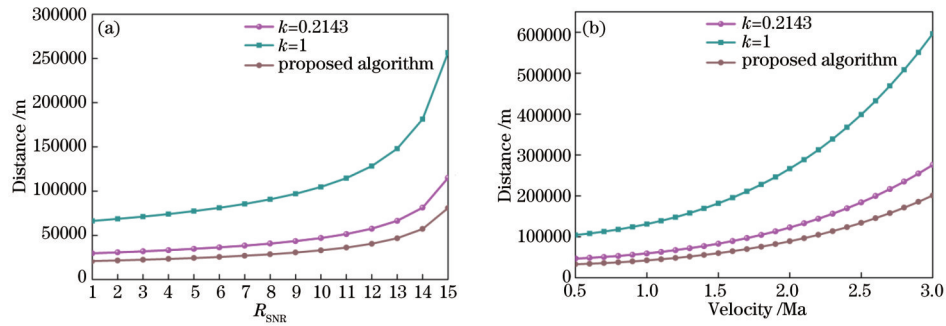


图 11 不同弥散系数下的探测距离变化。(a)不同弥散系数下的探测距离随 R_{SNR} 的变化曲线;(b)不同弥散系数下的探测距离随 UAV 集群速度的变化曲线

Fig. 11 Variation of detection distance under different dispersion coefficients. (a) Variation of detection distance with R_{SNR} under different dispersion coefficients; (b) variation of detection distance with UAV swarm speed under different dispersion coefficients

系统探测距离的影响,即本文中选取 $k=1$;文献[13]中考虑弥散系数对探测距离的影响,但是认为弥散系数是一个定值,文献中选取 $k=0.2143$;而本文综合考虑影响弥散现象的因素后将弥散系数 k 表征为探测距离 R 的函数,并通过公式推导得出 R 随着 k 的增大而增大的结论。

5 结 论

本文针对空天红外探测系统对 UAV 集群的探测能力进行分析。在对 UAV 集群飞行特性分析时,将其飞行过程划分为三个阶段;在研究 UAV 集群的红外辐射特性和目标成像特性后,对 UAV 集群的目标成像大小和点目标的弥散现象进行分析;在考虑目标成像的弥散特性以及目标和背景辐射强度差异的基础上,提出基于弥散系数的 NEFD 探测距离模型;最后通过仿真验证模型的有效性。采用本文提出的模型得到的探测距离大于其他模型,同时在考虑弥散系数的变化后,本文得到的探测距离小于其他文献的结果。在研究 UAV 集群的探测能力时,应充分考虑在不同背景环境下的 UAV 集群红外辐射特性,这将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] 宋怡然,林旭斌,武坤琳,等. 大国竞争战略下美国精确打击武器发展分析[J]. 战术导弹技术, 2020(2): 105-109.
Song Y R, Lin X B, Wu K L, et al. Analysis of the development of American precision strike weapons under the strategy of great power competition[J]. Tactical Missile Technology, 2020(2): 105-109.
- [2] 邹立岩,张明智,荣明. 智能无人机集群概念及主要发展趋势分析[J]. 战术导弹技术, 2019(5): 1-11, 43.
Zou L Y, Zhang M Z, Rong M. Analysis of intelligent unmanned aircraft systems swarm concept and main development trend[J]. Tactical Missile Technology, 2019(5): 1-11, 43.
- [3] 钟宇,吴晓燕,黄树彩,等. 红外预警卫星弹道导弹主动段探测能力[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3276-3281.
Zhong Y, Wu X Y, Huang S C, et al. Detection ability of infrared early warning satellite for ballistic missile in boost phase[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(11): 3276-3281.
- [4] 徐森,史浩东,王超,等. 空间目标多维度探测与激光通信一体化技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1206002.
Xu M, Shi H D, Wang C, et al. Technology for integrating space object multidimensional detection and laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1206002.
- [5] Liu J Z, Hamdulla A. Overview of infrared dim and small target detection methods[C]/ 2019 6th International Conference on Machinery, Mechanics, Materials, and Computer Engineering (MMMCE 2019). London: Francis Academic Press, 2019: 749-755.
- [6] 屈旭涛,庄东晔,谢海斌. “低慢小”无人机探测方法[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(2): 128-135.
Qu X T, Zhuang D Y, Xie H B. Detection methods for low-slow-small (LSS) UAV[J]. Command Control & Simulation, 2020, 42(2): 128-135.
- [7] Guvenc I, Koohifar F, Singh S, et al. Detection, tracking, and interdiction for amateur drones[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 75-81.
- [8] Opromolla R, Fasano G, Accardo D. A vision-based approach to UAV detection and tracking in cooperative applications[J]. Sensors, 2018, 18(10): 3391.
- [9] Wang C Y, Qin S Y. Adaptive detection method of infrared small target based on target-background separation via robust principal component analysis[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 69: 123-135.
- [10] 巢时宇,李桂祥,李志淮,等. 红外系统距离方程与作用距离分析[J]. 空军雷达学院学报, 2011, 25(5): 318-321.
Chao S Y, Li G X, Li Z H, et al. Analysis of distance equation and operating range of infrared system[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2011, 25(5): 318-321.
- [11] 牟达,韩红霞. 红外系统作用距离方程的比较与分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(4): 5-9.
Mu D, Han H X. Comparison and analysis for operating

- range equations of infrared system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 35(4): 5-9.
- [12] 毛峡, 常乐, 刁伟鹤. 复杂背景下红外点目标探测概率估算[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(11): 1429-1434.
Mao X, Chang L, Diao W H. Estimation for detection probability of infrared point target under complex backgrounds[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(11): 1429-1434.
- [13] Zhang Y, Si G Y, Wang Y Z. Simulation of unmanned aerial vehicle swarm electron magnetic operation concept [J]. Systems Engineering and Electronics, 2020(7): 1510-1518.
- [14] Rashid T, Khawaja H A, Edvardsen K, et al. Infrared thermal signature evaluation of a pure and saline ice for marine operations in cold climate[J]. Sensors & Transducers, 2015, 194(11): 62-68.
- [15] 周金伟, 李吉成, 石志广, 等. 高超声速飞行器红外可探测性能研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0504001.
Zhou J W, Li J C, Shi Z G, et al. Research of infrared detectability of hypersonic vehicle[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0504001.
- [16] 贺元兴, 张浩元, 司文涛, 等. 空中目标红外辐射强度计算通用模型及其应用[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0612007.
He Y X, Zhang H Y, Si W T, et al. General model for calculating infrared-radiation intensity of aerial target and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0612007.
- [17] 陈海龙, 张翱, 刘雪梅, 等. 低轨红外卫星对类 HTV-2 高超声速飞行器探测能力研究[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2104002.
Chen H L, Zhang A, Liu X M, et al. Research on detection capability of low-orbit infrared satellite to HTV-2-like hypersonic vehicle[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2104002.
- [18] Dombert P L, Kuhns A, Mengotti P, et al. Functional mechanisms of probabilistic inference in feature- and space-based attentional systems[J]. NeuroImage, 2016, 142: 553-564.
- [19] Li N, Lv Z H, Huai W Q, et al. A simulation method of aircraft plumes for real-time imaging[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 153-161.
- [20] 楼晨风, 张湧, 刘亚. 基于互补梯度增强的红外线列扫描图像小目标检测 [J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2104001.
Lou C F, Zhang Y, Liu Y. Small target detection of infrared linear array image based on complemented gradient enhancement[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2104001.