

## 云场景下天基红外探测可用度快速评估

赵家庆<sup>1,2,3\*</sup>, 丁翔<sup>1</sup>, 薛永宏<sup>1</sup>, 徐忠超<sup>1</sup>, 李泽亚<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 樊士伟<sup>1</sup>, 刘荣科<sup>3</sup>

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109;

3. 北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:** 天基红外探测场景下, 云的存在会对目标探测造成严重干扰, 导致无法连续检测跟踪目标, 降低系统探测效能。系统在凝视工作模式下, 背景在一段时间周期内变化较小, 可根据背景特性建模分析不同云场景下探测系统的可用度。将理论分析、图像仿真、解析建模等多种手段相结合, 对云场景下天基红外探测可用度进行快速评估。首先通过对目标穿越云层时的信杂比变化进行分析, 建立可用度的初步估计模型, 确定可用度的影响因素。然后在图像仿真和解析建模中, 基于仿真结果拟合了信杂比低于阈值图像帧数跟云参数之间的线性关系, 并结合参数物理含义建立可用度解析模型, 采用回归分析法确定模型系数。最后基于新的仿真工况对比天基红外探测可用度的仿真值、初步估计值和解析预测值, 验证模型的准确性和鲁棒性, 该模型可作为系统可用度效能评估的有益参考。

**关键词:** 天基红外探测; 云场景; 信杂比; 可用度

中图分类号: V19

文献标识码: A

## Fast evaluation of space-based infrared detection availability in cloud backgrounds

ZHAO Jia-Qing<sup>1,2,3\*</sup>, DING Xiang<sup>1</sup>, XUE Yong-Hong<sup>1</sup>, XU Zhong-Chao<sup>1</sup>, LI Ze-Ya<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, FAN Shi-Wei<sup>1</sup>, LIU Rong-Ke<sup>3</sup>

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;

2. Shanghai Aerospace Electronic Technology Research Institute, Shanghai 201109, China;

3. Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In space-based infrared detecting backgrounds, the presence of clouds would cause serious interference to target detection, making it impossible to continuously detect and track targets and reducing the system's detecting efficiency. For space-based detecting systems operating in starring mode, the background changes little over a period. It is feasible to analyze the detection system efficiency based on modeling background characteristics. Theoretical analysis, image simulation and analytical modeling methods are used together to perform a fast evaluation of space-based infrared platform availability under complex cloud backgrounds. Firstly, a preliminary evaluation model of space-based detection availability is established through analysis of the signal to clutter ratio when the target is crossing clouds. Factors influencing the detecting availability are determined through analysis. Then, a linear relationship is given between the frame numbers of losing parameters of the target and cloud based on simulated results. A theoretical model of availability is built up by analyzing the physical meaning of each parameter and the coefficient values are determined by regression analysis. Finally, the space-based detecting availabilities of the simulation, preliminary evaluation model, and theoretical model are compared under new simulating conditions, which verifies the correctness and robustness of the theoretical. The model in this work could be used as a reference value for evaluating the space-based optical detection system's availability.

**Key words:** space-based infrared detection, cloud backgrounds, signal to clutter ratio, availability

## 引言

天基红外探测系统具有抗干扰、视野广、距离远、精度高、时效性好等优点,成为复杂环境下探测弱小目标的重要手段<sup>[1-2]</sup>。然而在天基成像时,同一场景中可能存在众多复杂干扰要素,包括不同的陆地、河流、海洋、深空等背景类型<sup>[3-5]</sup>。其中,云表现出反射、散射、吸收等特征,并且具有数量多、出现概率高、可移动等特点,成为天基探测场景中干扰目标检测的重要影响因素<sup>[6-7]</sup>。针对特定探测场景设计的天基红外探测系统在存在移动云的复杂场景下,其目标检测信杂比等探测指标性能可能受到严重影响,进而降低探测可用度<sup>[8]</sup>。因此,需要研究场景中云对天基系统探测能力的影响,为可用度效能评估提供支撑。

国内外研究者对复杂背景下天基光学目标探测做了许多工作。在谱段分析方面,Mahulikar等人基于热分析模型,研究了飞机蒙皮特性如何影响其在3~5 μm和8~14 μm两个红外谱段的热辐射特性<sup>[9]</sup>。黄达等人综合考虑目标距离地面高度、大气传输、云层辐射、大气辐射等因素,从信噪比角度分析特征光谱图像,确定了适合天基探测的特征谱段<sup>[10]</sup>。在目标可探测性影响方面,袁航等人建立了海云背景的光谱辐射模型,仿真分析不同谱段和云类型下地球同步轨道红外成像系统的探测效能<sup>[11]</sup>。叶庆等人通过建立卫星、导弹、大气背景等辐射模型,结合STK软件仿真,对比DSP预警卫星在有无云层背景下的探测能力<sup>[12]</sup>。胡建明等人基于天基光学探测链路,分析目标出现在云顶部和底部时的信杂比,讨论了云的消光效应对目标可探测性的影响<sup>[13]</sup>。在目标检测方面,众多研究团队利用三维速度滤波算法<sup>[14]</sup>、人类视觉系统对比机制<sup>[15]</sup>、多尺度局部均匀性方法<sup>[16]</sup>、绝对方向均值差算法<sup>[17]</sup>、投影滤波算法<sup>[18]</sup>、多帧序列图像运动特征抑制虚警法<sup>[19]</sup>等多种途径进行目标增强和背景抑制,提高系统在复杂背景下对红外弱小目标的检测性能。通过以上文献可知,虽然当前复杂背景下红外目标检测的研究较多,但是集中于谱段分析、可探测性研究和检测算法优化等方面,较少涉及天基系统在轨运行时的可用度。当背景中存在复杂云时,天基探测系统在实际运用过程中的效能会由于云的干扰而进一步退化,需要对此做出进一步分析。

当天基红外探测系统处于凝视工作模式下时,场景中的云会对小目标的连续检测跟踪产生严重

干扰。如何基于无云场景数据和提取的云特性数据仿真评估系统在更一般云场景下的性能指标变化,并基于云参数建立天基红外探测可用度的模型,在天基系统的实际运用中具有重要的意义。文章通过依次仿真评估分析云影响天基红外探测可用度的主要因素,包括云的位置、数量、面积、速度、辐射强度等,建立可用度与云参数之间的解析模型,为复杂移动云场景下天基红外探测可用度快速评估提供理论指导。

## 1 云场景中目标天基探测影响因素分析

### 1.1 单帧图像信杂比

天基红外探测系统成像时,相机的空间分辨率通常大于目标的尺寸,因此,可近似认为是对点目标进行探测。由于大气传输、光学系统的点扩散等效效应,目标能量会向周围像元弥散,点目标呈现出不同的形态特性<sup>[20]</sup>。像面中心像元最大辐射强度 $I_{Tmax}$ 跟总辐射强度 $I_T$ 之间关系为圆函数的傅里叶变换平方<sup>[11]</sup>。单帧图像中点目标能被检测出的前提是目标与其邻域背景存在一定的差异性,检测时以目标为中心设置边长为 $L_n$ 的滑动窗口,邻域背景辐射强度均值 $\mu_B$ 为滑窗中除了目标部分的背景辐射强度均值,邻域背景空域杂波 $\sigma_B$ 为滑窗中除了目标部分的背景辐射强度标准差。信杂比(Signal to Clutter Ratio, SCR)定义为目标最大辐射强度与邻域背景平均辐射强度差的绝对值跟邻域背景空域杂波比<sup>[10]</sup>,如式(1)所示,

$$SCR = \frac{|I_{Tmax} - \mu_B|}{\sigma_B} \quad (1)$$

设云辐射强度均值和空域杂波分别是 $\mu_C$ 、 $\sigma_C$ ,其辐射强度经过因子 $n$ 缩放后为 $n \cdot \mu_C$ 、 $n \cdot \sigma_C$ 。目标跟云重叠时,目标中心像元最大辐射强度变为 $I_{Tmax2}$ 。在背景跟云辐射强度均服从相互独立的高斯分布情况下,两者叠加后的辐射强度仍服从高斯分布,此时,目标检测信杂比如式(2)所示,

$$SCR = \frac{|I_{Tmax2} - \mu_B - n \cdot \mu_C|}{\sigma_B + n \cdot \sigma_C} \quad (2)$$

目标中心像元最大辐射强度为目标本体辐射强度叠加背景辐射强度,减去邻域背景辐射强度均值可近似得到目标自身的最大辐射强度,因此式(1)和(2)中分子项均反映了目标自身辐射强度,两者近似相等。而云的出现使得杂波增大,降低检测信杂比。图1给出了信杂比随背景辐射强度及云辐射强度缩放因子的变化关系。背景辐射强度固定

时,云辐射强度的增大会导致目标检测信杂比降低。增大背景辐射强度会导致初始信杂比降低,但同时增大云辐射强度后,不同背景辐射强度下目标检测信杂比会趋于一致。

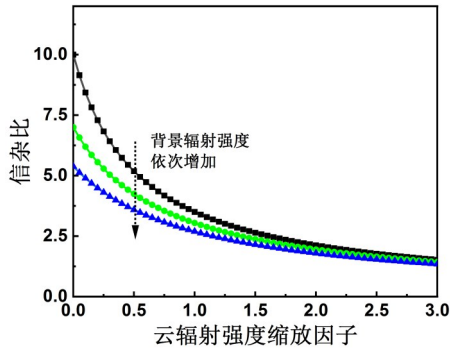


图1 背景辐射强度及云辐射强度缩放因子对信杂比的影响

Fig. 1 Influence of background's radiance and cloud's radiance scaling ratios on the SCR

## 1.2 序列图像可用度

对于目标生命周期为 $t$ 的序列图像,定义无云场景中初始探测可用度 $\eta_0$ 为目标生命周期中系统检测目标时空域信杂比大于某一阈值( $SCR_0$ )的时间( $t_0$ )比例,如式(3)所示,

$$\eta_0 = \frac{t_0}{t}, (SCR \geq SCR_0) \quad (3)$$

当目标以速度 $v_T$ 穿越云时,设目标经过弥散后在像面上呈现为一边长 $L_T$ 的正方形,云移动速度 $v_C$ ,云在目标轨迹上长度为 $L_C$ 。根据目标及邻域滑动窗口跟云重叠部分可分为两种情况,图2(a)中仅邻域背景跟云重叠,为目标即将进入和离开云层时,邻域背景跟云总重叠长度为 $L_N - L_T$ ,所需时间 $t_1 = (L_N - L_T)/(v_T - v_C)$ 。邻域背景辐射强度均值增大,根据公式(3)中估计的目标辐射强度减小,邻域背

景空域杂波增大,目标检测信杂比降低。图2(b)中目标跟云也重叠,发生在目标已经进入云层时段,目标跟云总重叠长度为 $L_C + L_T$ ,所需时间 $t_2 = (L_C + L_T)/(v_T - v_C)$ 。此时,估计的目标辐射强度近似等于初始值,邻域背景空域杂波变化取决于局部背景跟云辐射强度起伏分布,一般也会导致目标检测信杂比下降。

当目标出现在某固定背景区域中时,可通过统计目标在天基红外相机中视场时的检测信杂比计算可用度。当背景区域中出现速度为 $v_C$ 、长度为 $L_C$ 的云,根据式(4)计算出可用度最低值为 $\eta_0 - \frac{L_N + L_C}{(v_T - v_C) \cdot t}$ 。式(4)反映出云的速度及面积的增大会降低探测可用度,然而无法体现实际场景中不同云的辐射强度影响。需要进一步研究云参数对可用度的影响,建立更为准确通用的可用度解析模型。

$$\eta = \frac{t_0 - t_1 \pm t_2}{t} = \eta_0 - \frac{(L_N - L_T) \pm (L_C + L_T)}{(v_T - v_C) \cdot t} \quad (4)$$

## 2 云特征参数对可用度影响的仿真建模

### 2.1 仿真评估

为了充分评估实际场景中云不同参数对天基系统可用度的影响,首先生成目标与不同云参数(数量、面积、速度、辐射强度)下仿真场景数据,确定场景中目标的最大辐射强度,再以目标为中心设置边长为 $5 \times 5$ 和 $11 \times 11$ 的滑动窗口, $11 \times 11$ 邻域中减去 $5 \times 5$ 邻域部分的背景辐射强度均值为邻域背景平均辐射强度,辐射强度标准差为邻域背景空域杂波,最后根据公式(1)计算出空域信杂比。通过分析以上各因素对目标检测信杂比的影响,建立信杂比跟云参数之间的独立解析模型。

仿真图像数据采用在轨获取的红外图像作为

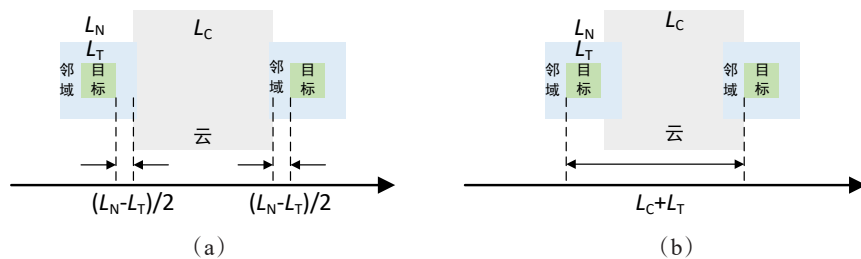


图2 目标穿越云时的重叠示意图(a)目标邻域背景跟云存在重叠,(b)目标与云存在重叠

Fig. 2 The illustration of one target crossing the cloud with overlap between (a) the target's neighborhood and the cloud and, (b) the target and the cloud

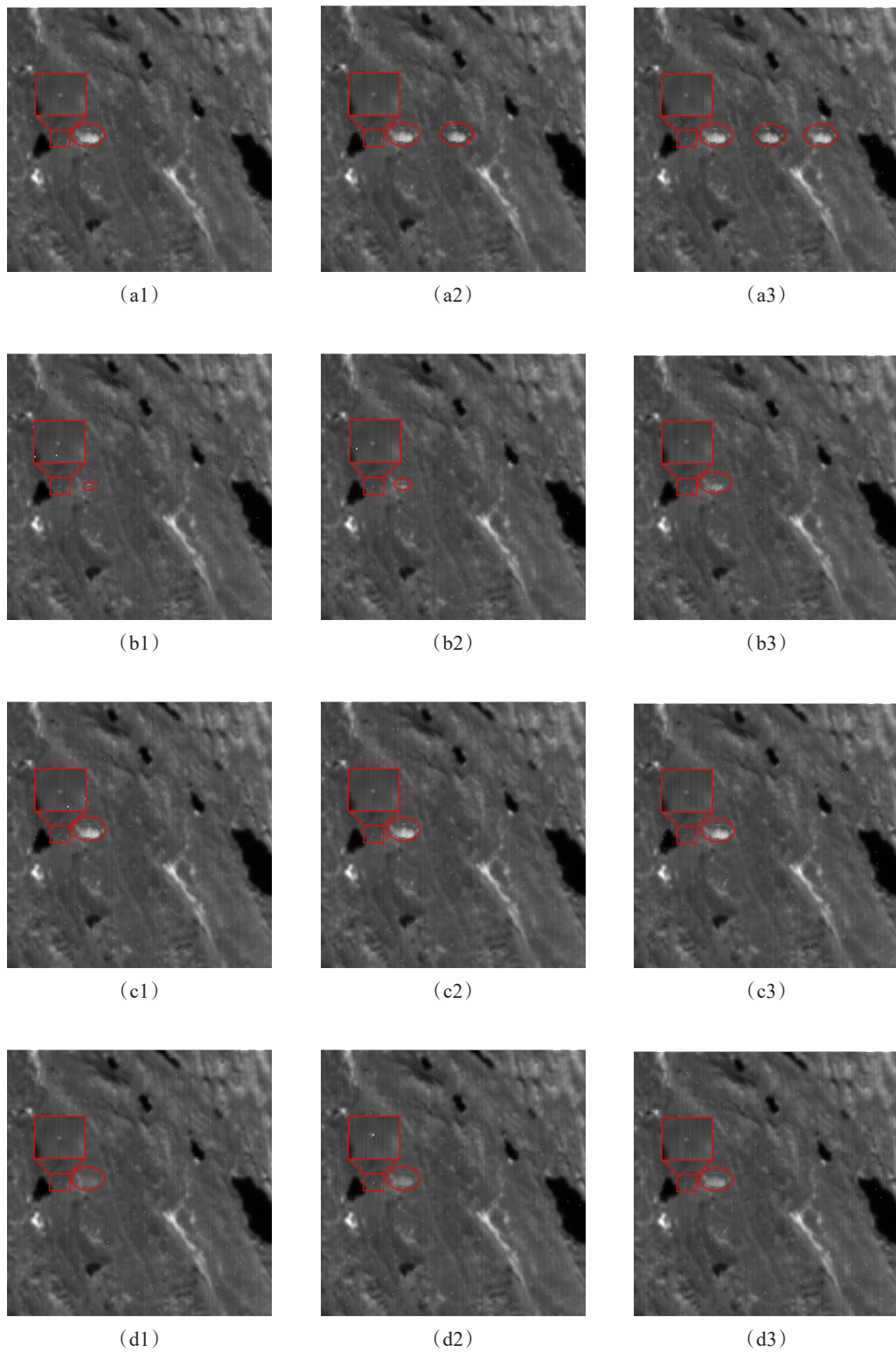


图3 目标在不同云参数场景中的仿真红外场景图(a)数量:1~3朵,(b)面积:25%、50%、75%,(c)速度:0.1 pixel/s、0.3 pixel/s、0.5 pixel/s和(d)辐射强度:20%、40%、60%

Fig. 3 Simulated infrared images of the target in the background with different cloud parameters (a) numbers: one to three, (b) size ratios: 25%、50%、75%, (c) speeds: 0.1 pixel/s、0.3 pixel/s、0.5 pixel/s and (d) radiance scaling ratios: 20%、40%、60%

背景,叠加经高斯弥散的红外弱小目标和参数(位置、数量、面积、速度、辐射强度)可调的云。仿真在MATLAB软件中实现,使用的配置环境如下:Windows 10 Pro, MATLAB R2021a, Intel(R) Core(TM) i7-5500U CPU@2.40 GHz, 8.00 GB RAM。探测器像元规模为 $500 \times 500$ ,空间分辨率为100 m,存在盲闪元和条带噪声。目标在图像中占据的像元数量不超过 $5 \times 5$ ,目标总辐射强度为500 W/Sr,移动速度3 pixel/s。仿真开始10 s后目标从(250, 100)处出现,沿水平方向运动至(250, 400)位置后消失,目标运动总时长为100 s。若云静止, $5 \times 5$ 的目标区域跟云累积重叠长度为48像元(134列至182列),目标周围的 $11 \times 11$ 滑窗邻域跟云累积重叠长度为54像元(131列至185列)。目标完整穿越云所需时间为16 s,目标所在的 $11 \times 11$ 滑窗邻域完整穿越云所需时间为18 s。为考察不同云参数场景对目标检测信杂

比的影响,以图3(a1)中云参数(初始位置相同、速度为0、面积为1、辐射强度为100%)为基准,设置了不同数量(1至3朵)、面积(25%、50%和75%)、速度(0.1 pixel/s、0.3 pixel/s、0.5 pixel/s)和辐射强度(20%、40%、60%)云在目标轨迹上的仿真场景,如图3所示。

为分析不同云参数(数量、面积、速度、辐射强度)场景对天基系统检测目标性能影响,采取公式(1)计算每一帧中的目标信杂比,并统计目标出现的100 s时长中信杂比超过阈值4帧数的比例作为天基探测可用度。图4(a)展示了0~3朵云场景中目标检测算法的信杂比曲线,云位置分别为(250, 150)、(250, 250)和(250, 350),每朵云的出现均会导致一定时间内目标检测信杂比降低,对应的探测可用度分别为100%、75%、59%和45%。图4(b)展示了不同云面积下目标检测信杂比随时间变化的

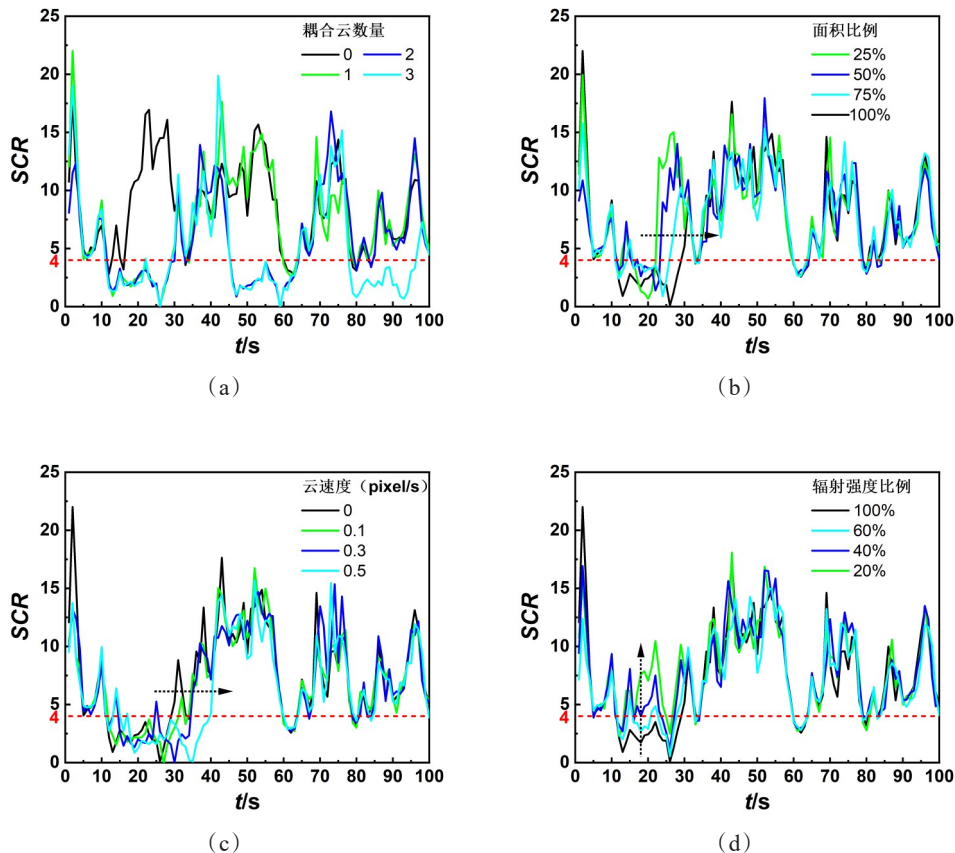


图4 目标在不同云参数场景中信杂比随时间变化关系(a)数量:0~3朵,(b)面积:25%、50%、75%、100%,(c)速度:0 pixel/s、0.1 pixel/s、0.3 pixel/s、0.5 pixel/s和(d)辐射强度:20%、40%、60%、100%

Fig. 4 Simulated SCR change over the time of the target in the background with different cloud parameters (a) numbers: zero to three, (b) size ratios: 25%、50%、75%、100%, (c) speeds: 0 pixel/s、0.1 pixel/s、0.3 pixel/s、0.5 pixel/s and (d) radiance scaling ratios: 20%、40%、60%、100%

关系,随着云面积的增大,信杂比低于目标检测阈值的图像帧数也随之增多。在云面积缩放比例为25%、50%、75%和100%情况下天基探测可用度分别为84%、80%、77%和75%。以坐标(250, 150)处的静止云为例,其会导致10 s至30 s时间范围内目标检测信杂比的降低。而提高云速度后,目标需要更多的时间穿越云,信杂比低于阈值的时间区间被拉长,如图4(c)所示。可统计出云速度为0 pixel/s、0.1 pixel/s、0.3 pixel/s和0.5 pixel/s下天基探测可用度分别为75%、73%、70%、67%。如图4(d)所示,当云辐射强度降低时,目标穿云时的信杂比增大。在云辐射强度缩放比例分别为20%、40%、60%和100%时的天基探测可用度为86%、83%、79%和75%。

尽管已经统计出不同云参数(数量、面积、速度、辐射强度)场景中天基探测可用度,但要实现快速评估,还需进一步分析信杂比跟云参数之间的解析模型。如公式(5)至公式(8)所示,以信杂比低于阈值4图像帧数(F)作为因变量,回归分析其跟云参数(数量、面积、速度、辐射强度)之间的解析关系。线性回归方程整体拟合度分别为0.99939、0.97826、0.99723和0.97756,可认为信杂比低于阈值4图像帧数跟云参数(数量、面积、速度、辐射强度)之间存在较强的正相关线性关系。

$$F = 10.1 + 15.1 \cdot N \quad , \quad (5)$$

$$F = 13.5 + 12 \cdot S \quad , \quad (6)$$

$$F = 25.2 + 15.8 \cdot v_c \quad , \quad (7)$$

$$F = 11.6 + 13.9 \cdot I \quad . \quad (8)$$

## 2.2 解析建模

由上述仿真结果可知,信杂比低于阈值4图像帧数跟云参数(数量、面积、速度、辐射强度)之间均存在一次多项式关系,因此天基探测可用度跟云四个参数之间可能存在不超过四次多项式关系。若直接建立通用的四次多项式,待拟合参数较多,并且也不存在明显物理意义。因此需要根据信杂比低于阈值4图像帧数跟云参数(数量、面积、速度、辐射强度)的线性关系及各参数物理意义建立天基探测可用度的解析模型,并进行拟合求解。

由公式(5)可知,仿真场景中无云时会约有10帧图像信杂比低于4,每朵云会导致约15帧图像信杂比低于4。信杂比低于4图像帧数由云面积确定,两者关系由公式(6)减去无云状态图像信杂比低于4帧数确定。而云速度会进一步增加信杂比低于4

图像帧数,放大倍数由公式(7)减去无云状态图像信杂比低于4帧数确定。公式(8)确定了云辐射强度缩放因子对信杂比低于4图像帧数的放大倍数。因此可初步推断可用度跟云参数(数量、面积、速度、辐射强度)间的解析关系应满足公式(9)所示的形式。

利用已有的13组仿真数据进行回归分析,可估计出a、b和c系数值约为10.918、2.430和12.366,解析模型如公式(10)所示,回归方程的整体拟合度为0.99743。可统计出13组仿真条件下经回归方程计算所得的天基探测可用度预测值跟仿真值最大误差约为1.53%。公式(10)为云除位置以外各参数均一致情况,如果每朵云的数量、面积、速度、辐射强度均不相同,更为一般的可用度模型如公式(11)所示,

$$\eta = 1 - (a + (b + c \cdot S)(v_c + 1) \cdot I \cdot N) / 100, \quad (9)$$

$$\eta = 0.89082 - (0.02430 + 0.12366 \cdot S)(v_c + 1) \cdot I \cdot N \quad , \quad (10)$$

$$\eta = 0.89082 - \sum_{i=1}^N (0.02430 + 0.12366 \cdot S)(v_c + 1) \cdot I \quad . \quad (11)$$

## 3 可用度模型验证

为验证上述可用度模型的实用性,需要生成跟原云参数存在较大差距的场景。通过对比可用度仿真值与模型预测值,验证模型的准确性和鲁棒性。如图5所示,验证场景一和二仿真参数设定为存在1朵云,但云位置、面积、速度、辐射强度与之前不同,可考察只基于单变量变化仿真结果建立的模型能否适应多变量同时变化情况。此外,由于之前仿真在改变云数量时,其他参数均无变化,因此,验证场景三和四设为存在2朵云,并改变云的位置、面积、速度和辐射强度。最后,验证场景五中存在3朵与目标轨迹重叠的云,验证场景六中额外增加了1朵远离目标的云,并改变每朵云的位置、面积、速度和辐射强度。

通过计算六种场景下目标检测信杂比可知,相比于无云场景,与目标轨迹有重叠云的引入会导致信杂比降低。表1为六种场景下的仿真可用度跟公式(4)和公式(11)预测的可用度的对比。在这六种场景下,公式(4)预测的可用度跟仿真值存在一定差异,最大误差约为22.99%。公式(11)计算的可用度预测值能跟仿真值吻合较好,最大误差约为0.56%,可认为该模型能够在云参数变化时对可用

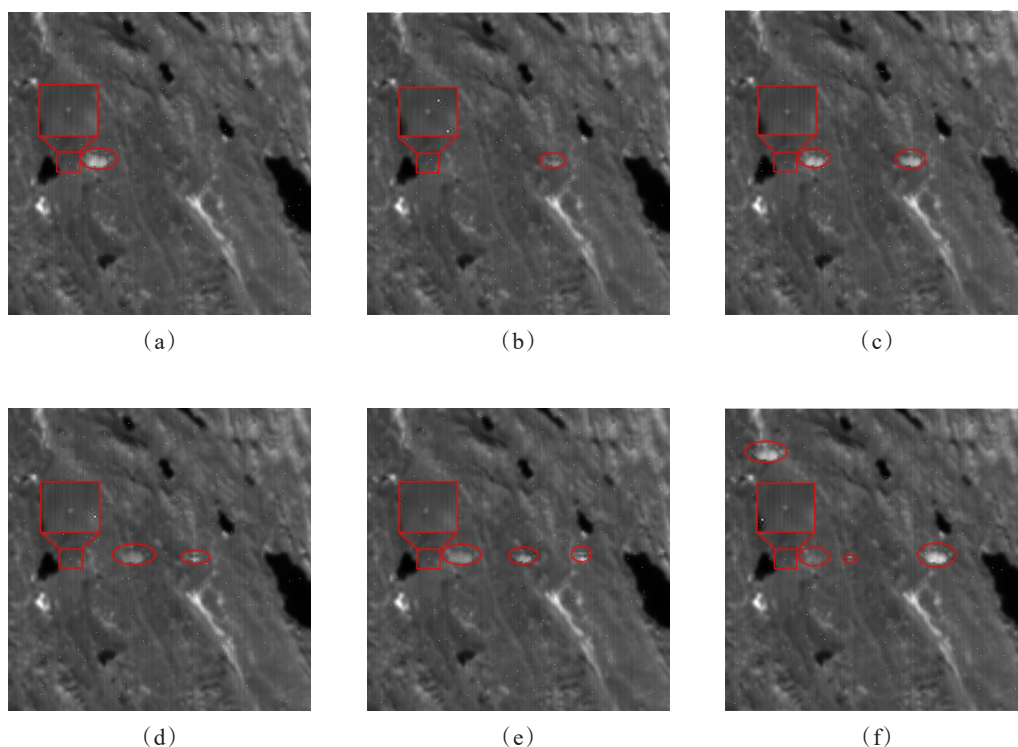


图5 用于模型验证的不同参数仿真红外场景图(a)场景1,(b)场景2,(c)场景3,(d)场景4,(e)场景5,(f)场景6

Fig. 5 Simulated infrared images of one target in the background with different simulation parameters for model verification (a) Scenario One, (b) Scenario Two, (c) Scenario Three, (d) Scenario Four, (e) Scenario Five and (f) Scenario Six

度进行较为准确的快速预测。

#### 4 结论

当目标在固定场景中穿越云时,天基红外探测可用度会受到云的影响而下降。首先通过理论分

析的方法对可用度的大致范围进行了初步评估,再基于实际背景图像仿真分别得到可用度跟云参数线性关系,并以上述线性关系为基础结合云参数物理意义建立可用度跟云参数(数量、面积、速度、辐

表 1 六种验证场景中可用度的仿真和预测值

Table 1 The simulated and predicted availability under the six verification scenarios

场景	耦合云参数					可用度				
	数量	起始位置	像面速度 (pixel/s)	辐射强度比例	面积比例	仿真值	公式(4)预测值	公式(4)误差	公式(11)预测值	公式(11)误差
一	1	(250,250)	0	0.8	1	0.77	0.73	5.19%	0.772 45	0.32%
二	1	(250,300)	0.4	0.5	0.6	0.82	0.765 38	6.66%	0.821 87	0.23%
三	2	(250,140)	0.2	0.8	0.9	0.63	0.603 57	4.20%	0.630 48	0.08%
		(250,300)	0.2	0.8	0.9					
四	2	(250,200)	0	0.5	1	0.73	0.615 19	15.73%	0.727 26	0.38%
		(250,300)	0.3	0.8	0.5					
五	3	(250,150)	0	0.5	1	0.6	0.462 07	22.99%	0.600 37	0.06%
		(250,250)	0.3	0.8	0.75					
		(250,340)	0.1	1	0.5					
六	3	(250,140)	0.3	0.2	0.75	0.65	0.562 96	13.39%	0.646 39	0.56%
		(250,200)	0.1	0.6	0.25					
		(250,340)	0.2	1	1					
		(80,60)	0.3	1	1					

射强度)的非线性解析模型,同时利用回归分析法给出模型对应的系数值。基于该解析模型预测的可用度在不同云参数场景下能较好地吻合仿真值,验证了模型的准确性和鲁棒性。本工作可用于凝视模式下天基红外探测系统在云场景中目标检测可用度的实时预测,为天基系统在复杂场景中的快速效能评估提供一定的理论支撑。

## References

- [1] NI Xin-Yue, YU Shu-Tian, SU Xiao-Feng, *et al.* Detection spectrum optimization of stealth aircraft targets from a space-based infrared platform [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, **54**: 1-12.
- [2] Dandumont C, Defrère D, Kammerer J, *et al.* Exoplanet detection yield of a space-based Bracewell interferometer from small to medium satellites [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2020, **6**: 035004.
- [3] ZHAO Ben-dong, XIAO Shan-Zhu, LU Huan-Zhang, *et al.* Spatial-temporal local contrast for moving point target detection in space-based infrared imaging system [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **95**: 53-60.
- [4] CHEN Lue, CHEN Xin, RAO Peng, *et al.* Space-based infrared aerial target detection method via interframe registration and spatial local contrast [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, **158**: 107131.
- [5] Schweitzer C, Gulde M, Horch C, *et al.* Nanosat-based detection and tracking of launch vehicles [J]. *Proceedings SPIE*, 2018, **10794**: 174-182.
- [6] Fu D J, Millet D, Wells K, *et al.* Direct retrieval of isoprene from satellite-based infrared measurements [J]. *Nature Communications*, 2019, **10**: 3811.
- [7] Taisne B, Perttu A, Tailpied D, *et al.* Atmospheric controls on ground- and space-based remote detection of volcanic ash injection into the atmosphere, and link to early warning systems for aviation hazard mitigation [M]. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Springer, Cham, 2018, 1079-1105.
- [8] FANG Yi-Qiang, CHEN Wei, SUN Xiao-Jun, *et al.* Effects of cloud on air target IR detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (方义强, 陈卫, 孙晓军, 等. 云对空中目标红外探测的影响. *红外与激光工程*) 2015, **44**: 2034-2038.
- [9] Mahulikar S, Vijay S, Potnuru S, *et al.* Aircraft engine's lock-on envelope due to internal and external sources of infrared signature [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, **48**: 1914-1923.
- [10] HUANG Da, HUANG Shu-Cai, ZHAO Wei, *et al.* Selection of future bands based on space-based detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**: S117005-1-S117005-6.
- [11] YUAN Hang, WANG Xiao-Rui, YUAN Ying, *et al.* Modeling and analysis of aircraft full-chain imaging characteristics in the sea surface and clouds from a space-based platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (袁航, 王晓蕊, 袁影, 等. 天基平台海云背景下飞机全链路成像特征建模与分析. *红外与激光工程*) 2020, **49**: 0204004-1-0204004-9.
- [12] YE Qing, WANG Ya-Fu, SHAO Li, *et al.* Detectability evaluation of DSP early-warning satellite [J]. *Opto-Electronic Engineering*, (叶庆, 汪亚夫, 邵立, 等. DSP预警卫星探测能力评估. *光电工程*) 2010, **37**: 65-72.
- [13] HU Jian-Ming, QIAO Kai, ZHI Xi-Yang, *et al.* Influence of complex environment on the detectability of weak and small aerial target under space-based observation mode [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (胡建明, 乔凯, 智喜洋, 等. 天基观测条件下复杂环境对空中弱小目标可探测性的影响. *红外与毫米波学报*) 2019, **38**: 351-357.
- [14] Jordan M, Hsu S M, Opar T P, *et al.* Detection and tracking of targets against a cloudscene background using space-based sensors [C]. *IEEE Aerospace Conference. Proceedings*, 2000: 365-371.
- [15] GUAN Xue-Wei, PENG Zhen-Ming, HUANG Su-Qi, *et al.* Gaussian scale-space enhanced local contrast measure for small infrared target detection [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, **17**: 327-331.
- [16] NIE Jin-Yan, QU Shao-Cheng, WEI Yan-Tao, *et al.* An infrared small target detection method based on multiscale local homogeneity measure [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **90**: 186-194.
- [17] Moradi S, Moallem P, Sabahi M F. Fast and robust small infrared target detection using absolute directional mean difference algorithm [J]. *Signal Processing*, 2020, **177**: 107727.
- [18] GONG Jin-Nan, ZHANG Yin, HOU Qing-Yu, *et al.* Background suppression for cloud clutter using temporal difference projection [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, **64**: 66-72.
- [19] WAN Min-Jie, GU Guo-Hua, CAO Er-Cong, *et al.* In-frame and inter-frame information based infrared moving small target detection under complex cloud backgrounds [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **76**: 455-467.
- [20] Nishiguchi K I, Kobayashi M, Ichikawa A. Small target detection from image sequences using recursive max filter [J]. *Signal and Data Processing of Small Target*, 1995, **2561**: 153-166.