

# 空中弱目标天基光学探测性能表征及匹配设计方法

乔凯<sup>1</sup>, 智喜洋<sup>2\*</sup>, 杨冬<sup>3</sup>, 巩晋南<sup>2</sup>, 胡建明<sup>2</sup>

- (1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;  
2. 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;  
3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 针对远距离空中弱目标光学探测的需求, 提出天基探测系统性能表征与关键指标匹配设计方法。首先立足于天基光学探测全链路, 分析得出影响天基观测条件下空中复杂环境背景中弱目标光学探测的主要因素, 包括场景杂波、探测系统的光谱辐射尺度、几何尺度等; 然后对上述影响因素进行表征建模, 建立目标的图像信噪比与影响要素之间的关系模型, 即探测系统性能表征模型; 最后以典型探测场景为例, 通过研究目标在不同场景杂波及探测多尺度耦合特性下的信噪比变化规律, 提出探测谱段优选及其与空间分辨率的匹配设计建议, 可为我国天基探测系统设计、指标论证、信息处理算法优化提供理论依据与科学指导。

**关键词:** 空中弱目标; 天基探测; 探测性能表征模型; 谱段优选; 匹配设计  
**中图分类号:** TN215   **文献标识码:** A

## A performance characterization and matching design method of space-based optical detection for weak aerial target

QIAO Kai<sup>1</sup>, ZHI Xi-Yang<sup>2\*</sup>, YANG Dong<sup>3</sup>, GONG Jin-Nan<sup>2</sup>, HU Jian-Ming<sup>2</sup>

- (1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;  
2. Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
3. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Aiming for long-distance optical detection of weak aerial targets, we in this paper propose a method of performance characterization and key indexes matching design for a space-based detection system. Firstly, we analyze the main factors that affect the optical detectability of weak targets under complex environment based on the full link of the space-based detection system, including scene clutter, spectral radiation scale and geometric scale of detection system, etc. We then combine the above influencing factors to establish a performance characterization model which represents the relationship between the image signal-to-noise ratio of target and the above-mentioned influencing factors, that is, the performance representation model of the detection system. Finally, taking a typical detection scene as an example, by studying signal-to-noise ratio of target under different scene clutter and multi-scale coupling characteristics, the optimization of detection spectrum and its matching design with spatial resolution are proposed, which can provide theoretical basis and scientific guidance for the design of the space-based detection system, demonstration of system indexes and optimization of information processing algorithms.

**Key words:** weak aerial target, space-based detection, characterization model of detection performance, spectral optimal selection, matching design

**PACS:** 97. 82. Cp, 42. 15. Eq

收稿日期: 2019-03-06, 修回日期: 2019-07-02

Received date: 2019-03-06, Revised date: 2019-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(61605035)

Foundation items: Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61605035)

作者简介(Biography): 乔凯(1981-), 男, 山西祁县人, 助理研究员, 主要从事遥感信息获取与处理、目标探测与识别等方面研究, E-mail: qk\_lucky@sohu.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: zhixiyang@hit.edu.cn

## 引言

随着隐身飞行器的全面列装与发展,复杂场景下的空中目标已成为未来战场的主要威胁,其雷达散射、红外辐射特征弱,而且受大气传输路径、云场景杂波、地表辐射等复杂环境背景的干扰,其辐射亮度很可能与背景相接近甚至更弱,使得目标可探测距离、预警时间、检测概率被大大降低.天基光学探测具有高精度、高时效、远距离的广域监视与探测能力,已成为复杂空中环境下弱目标及早发现、快速检测、跟踪识别的重要发展方向.

天基观测条件下的探测场景要素繁杂,不仅包含海洋、陆地、海陆边界等地表背景,还包含大气传输以及不同类型、高度、太阳光照下云场景的干扰,这些因素共同影响目标的可探测性能.目标信号进入探测系统入瞳后,探测系统自身的光谱分辨率、空间分辨率等又会进一步影响目标的可探测性能.且探测光谱、几何尺度的影响并非简单的正向或负向关系,不同尺度间存在耦合特性<sup>[1-3]</sup>,如空间分辨率越高,目标的可探测性不一定越强.事实上,提高几何的采样尺度的确可以增大目标的像元面积,提高目标的空间分辨率能力,但同时会导致进入探测系统入瞳处的背景杂波增多,从而造成目标的光谱可探测性降低.因此研究融入上述特性的空中弱目标天基光学探测性能表征模型,对于探测系统的匹配设计具有重要指导意义.

从天基光学探测的物理机理出发,分析影响目标可探测性的关键要素,建立探测系统性能表征模型.并选取典型应用案例,开展不同云场景、地表等复杂背景环境下弱目标的可探测性分析,提出探测谱段优选和光谱辐射与几何尺度的匹配设计建议,为我国天基探测系统设计、指标论证及信息处理算法优化提供理论依据与科学指导.

## 1 空中弱目标天基光学探测影响要素及性能表征模型

天基光学探测是采用天基平台及其搭载的光学探测系统获取目标场景图像,结合信息处理技术实现目标的快速检测与跟踪识别<sup>[4-6]</sup>.如图1所示,天基观测条件下的空中目标探测链路环节繁杂,不仅包含目标本身,还包含大气传输、各类云场景以及卫星平台、光学系统、探测器等成像环节.

对于空中弱目标的远距离光学探测而言,目标表现为几何形状、纹理细节等特征缺失,辐射亮度与背景环境相接近甚至更弱.本文将探测场景中几何、辐射特征与目标相近的背景环境称为场景杂波,显然场景杂波是影响弱目标可探测性的最重要因素之一.目标在场景杂波中能够被检出的前提是目标在图像中与背景之间具有一定的对比度,因此在不考虑探测系统的情况下,目标的可探测性即是目标与场景杂波的物理可分性,可通过目标与场景杂波的辐射能量差异来度量,可称之为目标信杂

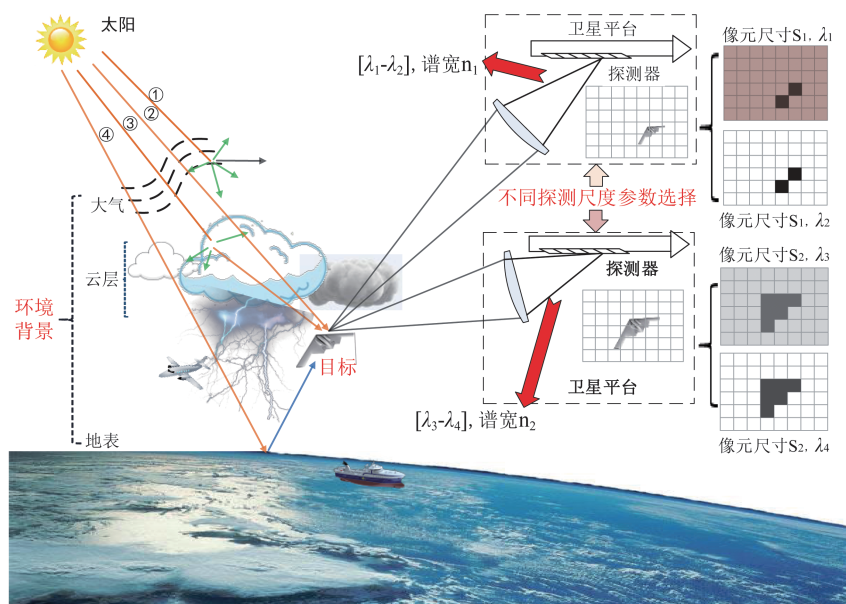


图1 天基光学探测示意图

Fig. 1 Sketch map of space-based optical detection

比,可用式(1)进行表征<sup>[7]</sup>:

$$SCR_{TAR} = \frac{\iint_{\Omega_{TAR}} T_{TAR} d\Omega_{TAR}}{\sigma_{SCE}^2}, \quad (1)$$

式中, $SCR_{TAR}$ 表示目标信杂比, $\Omega_{TAR}$ 表示目标区域, $T_{TAR}$ 表示目标辐射能量分布, $\sigma_{SCE}^2$ 表示背景辐射能量的均方差。

当目标信号达到探测系统入瞳后,探测焦面接收的目标能量不仅耦合了周边环境背景辐射,还会受到光学系统弥散、探测器的噪声、空间分辨率、辐射分辨率噪声等探测系统成像性能和探测尺度的影响<sup>[8-10]</sup>,目标与背景杂波的差异会发生改变,因此目标的探测性表征模型中应引入上述影响因素。

目标在探测器焦面上的辐射能量 $Q_{TAR}$ 与 $T_{TAR}$ 关系可表示为:

$$Q_{TAR} = t_{int} \tau \eta \iint_{\Omega_{Det}} T_{TAR} * h d\Omega_{Det}, \quad (2)$$

式中, $\tau$ 表示光学系统透过率, $t_{int}$ 表示积分时间, $\eta$ 表示探测器光电转换效率, $\Omega_{Det}$ 表示探测器光敏元区域, $h$ 表示光学系统的脉冲响应函数。

在天基探测系统中, $\tau$ 、 $t_{int}$ 和 $\eta$ 直接影响目标可探测的辐射尺度和时间尺度, $t_{int} \tau \eta$ 为目标能量的增益,采用探测增益系数 $G_{DET} = t_{int} \tau \eta$ 来表征。

对探测系统而言,光学系统的成像性能采用能量集中度( $EoF$ )来表征<sup>[11]</sup>,则式(2)可简化为:

$$Q_{TAR} = G_{DET} EoF \iint_{\Omega_{Det}} T_{TAR} d\Omega_{Det}, \quad (3)$$

式中, $EoF$ 定义为点扩散函数弥散斑在中心像元中所包含的能量与总能量的比值。

当目标中心与探测器中心重合时,接收的目标能量最高。在过采样体制下,目标在像平面的几何弥散小于探测像元的几何尺度,即 $\Omega_{TAR} \leq \Omega_{DET}$ ,此时式(3)可简化为:

$$Q_{TAR} = G_{DET} EoF \iint_{\Omega_{TAR}} T_{TAR} d\Omega_{TAR}. \quad (4)$$

我们知道决定最终目标可检测性的是探测器焦平面上目标与背景辐射能量的差异<sup>[12]</sup>,因此采用目标的图像信噪比( $SNR$ )表征可探测性能,进一步考虑到探测系统噪声的影响,综合以上各式,建立目标的探测性能表征模型如下:

$$SNR = G_{DET} EoF \frac{SCR_{TAR} \sigma_{SCE}^2}{\sigma^2 noise}, \quad (5)$$

式(5)中, $\sigma^2 noise$ 表示探测器噪声的均方差。

通过式(5)可以看出,目标的探测性能除了

与 $SCR_{TAR}$ 有关外,还与探测系统的能量集中度、探测时间尺度、电子学噪声有关。而能量集中度是光学响应函数和像元尺寸的函数,即主要与探测系统的几何尺度相关, $SCR_{TAR}$ 、 $\sigma^2 noise$ 及 $\sigma_{SCE}^2$ 主要与探测场景杂波和探测系统的光谱辐射尺度相关,综上可知,目标的探测性和可检测性与场景杂波、探测系统的光谱辐射尺度、几何尺度、时间尺度密切相关。

## 2 典型弱目标探测多尺度耦合特性及匹配设计

### 2.1 天基弱目标探测多尺度耦合特性分析与匹配设计方法

天基弱目标探测多尺度耦合特性分析与匹配设计方法如图2所示。首先建立包含典型目标与不同背景杂波起伏的探测场景辐射特性数据库,利用目标信杂比和基于图像信噪比的目标可探测性能表征模型,优选探测中心波长和谱宽;然后,在固定探测时间尺度的前提下,结合目标检测算法分析在不同光谱辐射尺度下,目标的图像信噪比随不同探测几何尺度的变化规律,即可分析得出天基弱目标光学探测的多尺度耦合特性;最后针对典型探测场景,以图像 $SNR > 6$ 为应用案例(此时可实现目标检测概率不小于97%、虚警概率不大于 $5 \times 10^{-5}$ 的检测性能),提出探测系统的光谱分辨率、几何分辨率等关键指标的匹配设计建议。

下面将以典型隐身目标为例,分析目标在8~15 km飞行高度、0.8~2.2 Ma飞行速度,以及不同大气条件、云背景(云类型包括:层积云、高层卷云等;目标与云背景的相对位置关系包括:目标位于云层内部、云层边缘)探测条件下的图像信噪比变化规律。

### 2.2 典型弱目标探测光谱辐射尺度的优选

由文献[13-15]可知,通过目标信杂比模型可分析出:2.7  $\mu m$ 、3.3  $\mu m$ 和4.3  $\mu m$ 附近的谱段可作

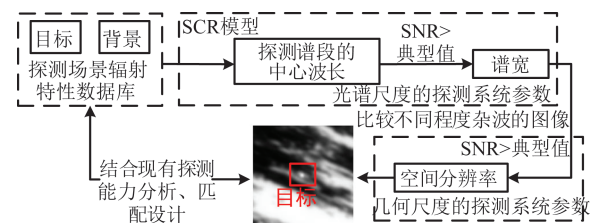


图2 探测多尺度耦合特性分析与匹配设计

Fig. 2 Multi-scale coupling characteristics analysis and matching design



为典型空中隐身目标天基光学探测的优选探测波段. 本文选取典型隐身目标为例,在目标不同飞行高度、飞行速度和大气条件、云背景下,分析信噪比随中心波长、谱宽的变化规律. 限于篇幅,下面以目标飞行高度为10 km,飞行速度为0.8 Ma为例,给出一组信噪比的计算结果,具体输入条件如表1所示,计算结果如表2所示.

表1 典型目标、背景与探测系统参数

Table 1 Typical target, background and detection system parameters

目标	背景	探测系统
速度0.8 Ma 飞行高度10 km	高层卷云 1976美国标准大气	观测天顶角180°
		观测方位角0°
		空间分辨率30 m
		谱段宽度50 nm

通过对比分析不同中心波长处的图像信噪比计算结果可知,SNR在2.76  $\mu\text{m}$ 、3.34  $\mu\text{m}$ 和4.26  $\mu\text{m}$ 达到峰值,因此可选择这三个特征谱作为中心波长. 进一步,通过分析不同谱段宽度下的目标可探测性,给出适当的光谱辐射尺度,即光谱分辨率.

实际探测器在中心波长附近具有一定的谱段宽度,谱宽的大小影响探测系统对目标能量的收集能力,从而影响目标的可探测性. 谱段宽度并不是

越宽越好或越窄越好,其设计与谱线中心附近目标和背景辐射能量的对比度、探测系统的灵敏度、动态范围、加工工艺等均密切相关. 表3所示为不同谱宽下的SNR计算结果,可以看出,在2.76  $\mu\text{m}$ 、3.34  $\mu\text{m}$ 和4.26  $\mu\text{m}$ 中心波长处,SNR分别在谱宽为30 nm、50 nm和50 nm时达到峰值,考虑到现有探测器硬件工艺、成本等条件的限制,建议选取谱宽为50 nm较为合理,此时探测器总体能量处于较高的收集水平,同时易于工艺实现. 图3(a)~(c)分别为以2.76  $\mu\text{m}$ 、3.34  $\mu\text{m}$ 和4.26  $\mu\text{m}$ 为中心波长,谱宽为50 nm时探测图像的仿真结果,从图中可见,目标和探测背景间的对比度差异性较大,具有较好的目标可探测性能.

### 2.3 光谱尺度与几何尺度的匹配设计

本节是在优选探测谱段中心波长和谱宽的基

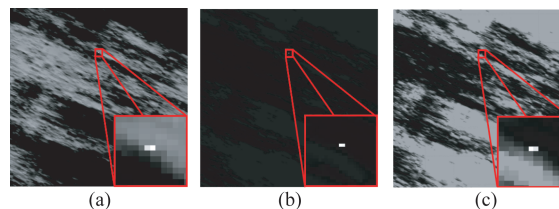


图3 在不同探测谱段情况下的目标与背景仿真图像:(a) 2.76  $\mu\text{m}$ , (b) 3.34  $\mu\text{m}$ , (c) 4.26  $\mu\text{m}$

Fig. 3 Simulation images of target and background in different detection bands: (a) 2.76  $\mu\text{m}$ , (b) 3.34  $\mu\text{m}$ , (c) 4.26  $\mu\text{m}$

表2 不同中心波长情况下的图像信噪比计算结果

Table 2 Results of image signal-to-noise ratio under different central wavelengths

中心波长( $\mu\text{m}$ )	SNR	中心波长( $\mu\text{m}$ )	SNR	中心波长( $\mu\text{m}$ )	SNR			
2.7附近	2.66	1.62	3.3附近	3.26	4.77	4.3附近	4.22	9.60
	2.68	2.06		3.28	7.68		4.24	21.96
	2.70	3.29		3.30	10.01		4.26	22.45
	2.72	3.24		3.32	14.14		4.28	20.88
	2.74	6.40		3.34	15.86		4.30	20.74
	2.76	8.61		3.36	15.35		4.32	15.56
	2.78	6.56		3.38	14.31		4.34	15.47
	2.80	3.54		3.40	10.63		4.36	5.51

表3 不同谱段宽度情况下的图像信噪比计算结果

Table 3 Results of image signal-to-noise ratio under different spectral widths

中心波长( $\mu\text{m}$ )	谱宽(nm)	SNR	中心波长( $\mu\text{m}$ )	谱宽(nm)	SNR	中心波长( $\mu\text{m}$ )	谱宽(nm)	SNR
2.76	10	3.87	3.34	10	13.21	4.26	10	12.62
	30	6.04		30	14.38		30	15.91
	50	5.63		50	15.92		50	23.00
	100	3.33		100	10.28		100	10.37
	200	3.20		200	6.08		200	4.84
	300	2.63		300	5.49		300	3.30

基础上,进一步研究光谱辐射尺度与空间几何尺度之间的匹配关系,从而实现空间分辨率与光谱分辨率的匹配设计.表4为在 $2.76\ \mu\text{m}$ 、 $3.34\ \mu\text{m}$ 和 $4.26\ \mu\text{m}$ 中心波长处,不同几何分辨率情况下的图像信噪比计算结果.图4给出了在 $2.76\ \mu\text{m}$ 波长处,空间分辨率分别为70 m、45 m、25 m情况下的目标与背景仿真图像.

通过表4和图4可以看出,针对典型隐身目标,在中心波长 $2.76\ \mu\text{m}$ 、 $3.34\ \mu\text{m}$ 和 $4.26\ \mu\text{m}$ 、谱段为50 nm处,当空间分辨率不低于45 m(如图4(b)所示)时,满足 $\text{SNR}>6$ ,结合目标检测算法可实现高概率、低虚警率的目标检测能力.当然,该结论仅是针对本文设定的典型探测场景、探测条件和目标检测算法情况下得出的,还需结合后续在轨实测数据开展进一步的深化研究与论证,但提出的模型与方法共性的,可支撑任意探测场景应用条件下的目标可探测性能分析,从而科学指导天基光学探测系统关键指标的匹配设计与信息处理算法优化.

### 3 结论

从空中复杂环境弱目标天基光学探测机理出

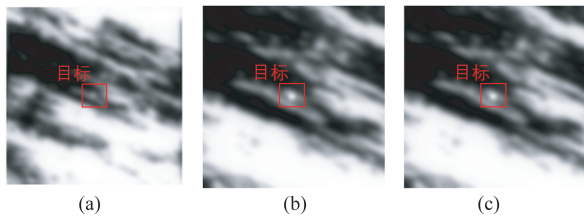


图4 中心波长为 $2.76\ \mu\text{m}$ 、谱宽为50 nm,不同分辨率情况下的仿真图像:(a) 70 m,(b) 45 m,(c) 25 m

Fig. 4 Simulated images with different resolutions when the central wavelength is  $2.76\ \mu\text{m}$  and the spectral width is 50 nm: (a) 70 m, (b) 45 m, (c) 25 m

表4 不同空间分辨率情况下的图像信噪比计算结果

Table 4 Results of image signal-to-noise ratio under different spatial resolutions

中心波长 ( $\mu\text{m}$ )	几何分辨率 (m)	SNR	中心波长 ( $\mu\text{m}$ )	几何分辨率 (m)	SNR	中心波长 ( $\mu\text{m}$ )	几何分辨率 (m)	SNR
2.76	20	6.48	3.34	20	6.05	4.26	20	22.95
	25	7.63		25	7.83		25	18.82
	30	6.58		30	13.25		30	21.68
	35	7.40		35	18.36		35	26.09
	40	6.28		40	13.29		40	23.68
	45	6.18		45	17.87		45	15.13
	50	4.85		50	12.62		50	6.90
60	3.37	60	10.73	60	5.09			
70	2.90	70	4.87	70	4.75			

发,分析得出影响目标可探测性的关键因素,包括场景杂波与探测尺度等,并对其进行表征建模,建立基于目标的图像信噪比的可探测性能表征模型;然后结合目标信杂比和图像信噪比模型以及目标检测算法,提出天基弱目标探测的几何、光谱辐射等多尺度耦合特性分析与相应探测系统指标的匹配设计方法;最后以典型隐身目标为例,通过计算其在典型探测场景、不同光谱、几何等探测尺度下的图像信噪比,并综合考虑现有器件工艺水平和目标检测算法能力,以目标的图像信噪比 $>6$ 为应用需求,提出探测谱段优选及其与空间分辨率的匹配设计建议:优选 $2.76\ \mu\text{m}$ 、 $3.34\ \mu\text{m}$ 和 $4.26\ \mu\text{m}$ 作为探测谱段的中心波长,谱宽为50 nm,空间分辨率应不低于45 m.

### References

- [1] Lindeberg T. Generalized Gaussian scale-space axiomatics comprising linear scale-space, affine scale-space and spatio-temporal scale-space [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2011, **40**(1): 36-81.
- [2] Gong J, Hou Q, Zhang W, et al. Non-local and nonlinear background suppression method controlled by multi-scale clutter metric [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **71**: 18-27.
- [3] Bai X, Zhou F. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection [J]. *Pattern Recognition*, 2010, **43**(6): 2145-2156.
- [4] Han J, Zhang D, Cheng G, et al. Object detection in optical remote sensing images based on weakly supervised learning and high-level feature learning [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, **53**(6): 3325-3337.
- [5] Cheng G, Han J. A survey on object detection in optical re-

- remote sensing images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, **117**: 11–28.
- [6] Qi S, Ma J, Tao C, *et al.* A robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various complex backgrounds[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, **10**(3): 495–499.
- [7] Kim S, Lee J. Scale invariant small target detection by optimizing signal-to-clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track [J]. *Pattern Recognition*, 2012, **45**(1): 393–406.
- [8] Gao K, Zhu Z, Dou Z, *et al.* Variable exponent regularization approach for blur kernel estimation of remote sensing image blind restoration[J]. *IEEE Access*, 2018, **6**: 4352–4374.
- [9] Li J, Liu Z, Liu F. Using sub-resolution features for self-compensation of the modulation transfer function in remote sensing[J]. *Optics express*, 2017, **25**(4): 4018–4037.
- [10] Li J, Xing F, Sun T, *et al.* Efficient assessment method of on-board modulation transfer function of optical remote sensing sensors[J]. *Optics express*, 2015, **23**(5): 6187–6208.
- [11] Challenger W A, Peng C, Itagi A V, *et al.* Heat-assisted magnetic recording by a near-field transducer with efficient optical energy transfer[J]. *Nature photonics*, 2009, **3**(4): 220.
- [12] Swayze G A, Clark R N, Goetz A F H, *et al.* Effects of spectrometer band pass, sampling, and signal-to-noise ratio on spectral identification using the Tetracorder algorithm [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2003, **108**(E9).
- [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*), 2018, **38**(3): 351–357.
- [14] Mahulikar S P, Sonawane H R, Rao G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles [J]. *Progress in aerospace sciences*, 2007, **43**(7–8): 218–245.
- [15] Huang D, Huang S. Dim and Small Target Detection Based on Characteristic Spectrum[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2018, **46**(11): 1915–1923.