

导弹尾焰光谱的模糊识别

黄 达, 黄树彩, 赵 炜, 陆 屹, 曹文焕

(空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051)

摘 要: 分析导弹尾焰可知, 影响其光谱变化的主要因素包括发动机、燃料等, 故根据尾焰光谱可以达到导弹型号识别的目的。为保证识别效率, 用特征光谱代表尾焰特征, 可大大缩减数据量。首先根据光谱差模型计算出各波长处的辐射差, 通过设定阈值将辐射差分段, 高于阈值的波段即为所选的特征波段。改变积分步长和阈值可获得几组不同数据。分别采用光谱角匹配算法(Spectral Angle Matching algorithm, SAM)和模糊算法对不同精度和不同特征波段的数据进行处理, 得到识别结果。以识别结果的正确率和待识别样本与各型光谱的相似度距离为衡量标准, 模糊算法识别效果可与 SAM 相当, 但其在算法复杂度方面优于 SAM。

关键词: 光谱识别; 导弹尾焰; 模糊算法; SAM

中图分类号: TN273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1026001

Fuzzy recognition of missile tail flame spectrum

Huang Da, Huang Shucui, Zhao Wei, Lu Yi, Cao Wenhuan

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: The analysis of the missile plume shows that the main factors influencing its spectral change include the engine, fuel, etc., so the purpose of missile model recognition can be achieved according to the tail flame spectrum. In order to ensure the efficiency of recognition, the characteristic spectrum was used to represent the plume characteristics, which can greatly reduce the data volume. Firstly, the radiation difference of each wavelength was calculated according to the spectral difference model. By setting the threshold value, the radiation difference segment was obtained, and the band of higher than the threshold was the selected characteristic band. Changing the number of steps and thresholds can obtain several sets of different data. The Spectral Angle Matching algorithm (SAM) and fuzzy algorithm were used to deal with the data of different precision and different feature bands. The accuracy of the recognition results and the similarity distance between the samples and the different spectra were measured, and the fuzzy algorithm can identify with SAM, but it was better than SAM in algorithm complexity.

Key words: spectrum identification; missile stern flame; fuzzy algorithm; SAM

收稿日期: 2018-05-13; 修订日期: 2018-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(61573374); 国家自然科学基金青年科学基金(61503408); 航空科学基金(20150196006)

作者简介: 黄达(1994-), 男, 硕士生, 主要从事红外弱小目标检测识别方面的研究。Email: 809710379@qq.com

导师简介: 黄树彩(1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事模式识别方面的研究。Email: hsc67118@126.com

0 引言

多光谱图像是通过光谱探测器获得的多个波段的图像^[1],其包含空间、波长和灰度(辐射亮度)等信息,将某一固定像元的不同波长的图像辐射值表示成曲线则形成光谱曲线^[2]。

导弹尾焰中含有大量的 H₂O 和 CO₂,H₂O 和 CO₂ 的特征光谱在 2.7、4.3 μm 附近,所以导弹尾焰在波长 2.7、4.3 μm 附近有相对强的辐射,即其光谱曲线在波长 2.7、4.3 μm 附近出现波峰,再加上尾焰高温、高亮度的特点,使其可以被远距离的天基预警卫星探测到^[3-4]。

在相同的外界条件下,不同类型导弹因使用的燃料、发动装置存在差异,其产生的尾焰的温度、亮度及所含物质的成分不同,故其光谱形状和强度不同^[4-6],可根据此特征对导弹进行识别。

现有的光谱识别算法可分为两大类:一类是基于匹配原理,比如光谱角匹配(SAM)、欧式距离匹配等^[7-8],这类算法能够保证识别结果的正确性,但其需要数据库的支持,庞大的数据库的建立具有难度且实时性难以保证;另一类是基于学习算法,比如神经网络算法、主成分分析(PCA)等^[9-10],该类算法具有强鲁棒性,对于复杂的应用,其学习方法和网络结构的选择难度大且实时性难以满足。

天基导弹的探测系统必须达到实时性、高正确率的要求,否则会失去预警意义。基于此,提出导弹尾焰特征光谱探测,并使用具有快速性特点的模糊算法进行目标识别^[11]。

以高光谱数据为基础,根据特征光谱的规律,从光谱精度和特征波段长度两方面进行数据压缩,以保证检测正确率的同时达到实时性的要求。

1 模糊识别算法分析

1.1 特征波段的选择

文中所应用光谱均是归一化光谱,归一化规则为:

$$f'(\lambda) = \frac{f(\lambda)}{\max(f(\lambda_i))} \quad (1)$$

式中: f' 为归一化后的光谱; f 为原始光谱; λ 为波长; λ_i 为所选波长的集合。

模糊识别算法的分析可分为 5 个步骤:(1)特征

波段的选择;(2)光谱精度的选择;(3)隶属度的确定;(4)模糊识别;(5)识别效果分析。算法分析流程图如图 1 所示。

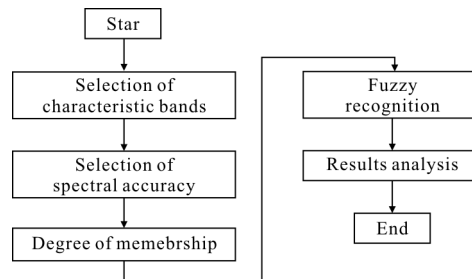


图 1 模糊算法分析流程图

Fig.1 Flow chart of analysis of fuzzy algorithm

根据不同类型导弹尾焰光谱亮度在特征波段处差异最大的原则,确定特征波段。假设矩阵 y 表示数据库中的光谱集:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (2)$$

式中: m 表示数据库中导弹尾焰的光谱波段数; n 表示数据库中的导弹类型数; $y_{11} y_{12} \cdots y_{nm}$ 表示光谱亮度。特征波段选择的规则的数学表达式如下:

$$J = \sum_{i,j}^n |y_i - y_j| \quad (3)$$

式中: $|\cdot|$ 为绝对值符号; J 为一个 $1 \times m$ 的向量。

公式(3)表示库中各型导弹尾焰光谱做差,再对其差向量中各元素做绝对值处理,最后将处理后的差向量求和。

设阈值向量为:

$$T = [T_1 \quad T_2 \quad \cdots \quad T_m] \quad (4)$$

$J-T$ 中大于 0 的元素所对应波长即为所选的特征波长,对于特征波长连续的视为一个特征波段。

1.2 光谱精度的选择及隶属度的确定

(1) 光谱精度的选择:在已选的特征波段进行样本采集,不同采样精度(步长)对识别效果有所不同,需要在现有设备能够满足的条件下,选择出合适的采样精度,使得模糊识别的效果最佳。

假设有 n 种导弹,每种导弹采集 m 个波段的样本,每个波段的样本含有 R 个波长的数据。 L 表示样

本集,则有

$$L = \{ [\cdot]_{m \times R1}^1, [\cdot]_{m \times R2}^2, \dots, [\cdot]_{m \times Rn}^n \} \quad (5)$$

(2)隶属度的确定:理论上,隶属度要根据经验来确定,此处根据数理统计方法得到概率值,进而确定隶属度。

根据时间段来确定概率为:

$$P_i = \frac{t_i}{t_1 + t_2 + \dots + t_m} = \frac{t_i}{\sum_{r=1}^m t_r} \quad (6)$$

公式(6)表示第 i 组数据所用的时间与一次完整的开关机过程所用的时间的比值,此方法包含时间信息,在实际检测中更具可信性,但其时间信息的获取及数据库的建立具有一定难度。

根据数据出现频率确定概率为:

$$P_\lambda = \frac{f_\lambda^i}{f_\lambda^1 + f_\lambda^2 + \dots + f_\lambda^m} = \frac{f_\lambda^i}{\sum_{r=1}^m f_\lambda^r} \quad (7)$$

公式(7)表示以单波长辐射的数理统计来确定概率,需要对开机到关机全过程的光谱进行采样,具有一定难度。

根据波段数确定概率为:

$$P_\lambda = \frac{1}{N} \quad (8)$$

公式(8)根据所采集光谱波段个数来确定隶属概率,相比前两种方法具有一定缺陷,但此方法所需数据量少,处理简单,可用于理论分析中。

2 数据的来源

2.1 数据的产生

在积分精度为 $0.1 \mu\text{m}$,识别波段为 $2\sim 5 \mu\text{m}$ 的条件下进行算法应用。库中导弹尾焰光谱各波长处加入随机数生成待识别样本,文中光谱数据均是归一化后的数据。

从参考文献[12]中得到 3 种导弹尾焰光谱,其光谱图如图 2 所示。

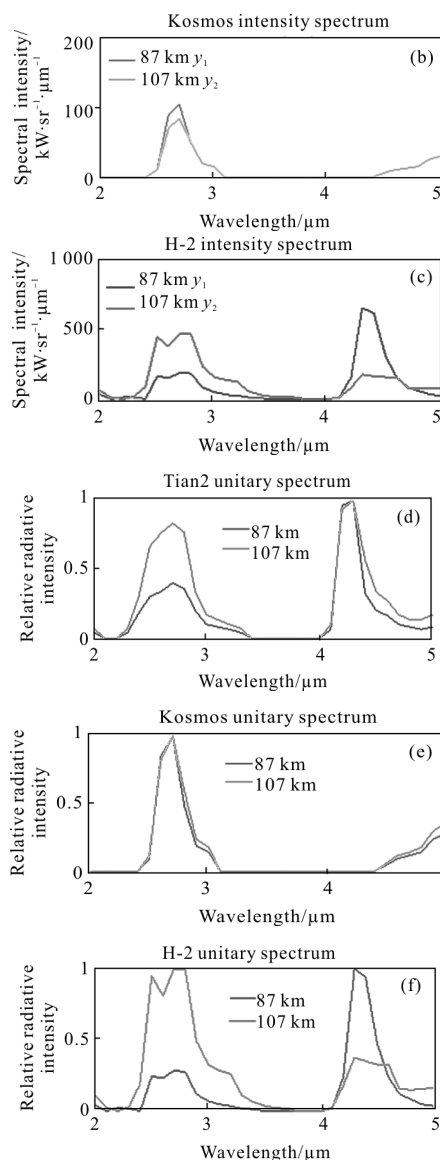
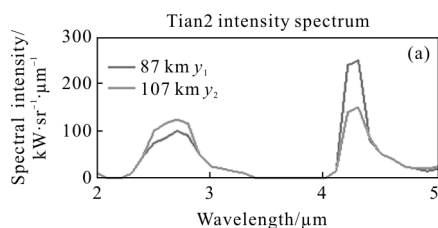


图 2 三种导弹光谱图

Fig.2 Three missile spectrums

图 2 中包含美国的 Tian2, 俄罗斯的 Kosmosis 和日本的 H-2 导弹在 87 km 和 107 km 的光谱,分别对应标号为 $y_1\sim y_6$,图 2(a)~(c)为原始光谱,图 2(d)~(f)为对应的归一化光谱,可以看出:归一化的光谱线型与原始光谱线型有所不同。

图 3 中 $s_1\sim s_6$ 为待识别的光谱,其中 s_1 与图 2 中 y_1 的光谱完全相同,此处可将 s_1 作为验证算法可行性的参考; $s_2\sim s_6$ 依次在 $y_2\sim y_6$ 的基础上进行非线性变化所得,非线性变化遵循如下规则:

- (1) 波峰所对应波长的变化范围为 $0.1 \mu\text{m}$;
- (2) 变化后和变化前在 $2.7 \mu\text{m}$ 附近的辐射与

4.3 μm 附近的辐射的比值差距不大,以保证光谱的基本形状。

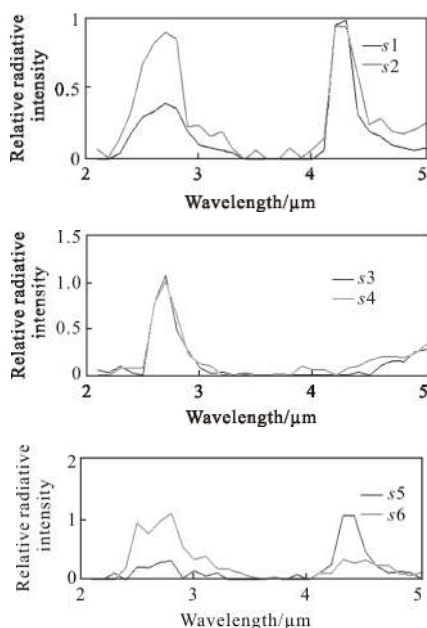


图 3 样本光谱图

Fig.3 Sample spectrogram

对 $s1\sim s6$ 进行全波长光谱角识别,识别结果如表 1 所示。

表 1 全波长光谱角测度结果

Tab.1 Results of full wavelength spectral angular measurement

| | $y1$ | $y2$ | $y3$ | $y4$ | $y5$ | $y6$ |
|------|------|------|------|------|------|------|
| $s1$ | 1.00 | 0.93 | 0.42 | 0.43 | 0.79 | 0.65 |
| $s2$ | 0.91 | 0.99 | 0.68 | 0.69 | 0.76 | 0.87 |
| $s3$ | 0.41 | 0.41 | 0.98 | 0.98 | 0.31 | 0.77 |
| $s4$ | 0.48 | 0.70 | 0.97 | 0.98 | 0.41 | 0.83 |
| $s5$ | 0.77 | 0.77 | 0.28 | 0.30 | 0.98 | 0.85 |
| $s6$ | 0.61 | 0.83 | 0.78 | 0.80 | 0.56 | 0.99 |

观察表 1 可知,如果采用最大概率原则对导弹类型进行判断,则可知 $s1$ 属于 $y1$ 的概率是 1.00, $s2$ 属于 $y2$ 的概率为 0.99, $s3$ 属于 $y3$ 的概率为 0.98, $s4$ 属于 $y4$ 的概率为 0.98, $s5$ 属于 $y5$ 的概率为 0.98, $s6$ 属于 $y6$ 的概率为 0.99, 光谱角识别结果正确率为 100%。

对 $s1$ 来说,其与 $y1\sim y6$ 的相似度之间有一定的差距,即 $s1$ 属于库中各型导弹的概率之间有一定差

值,此处称这样的差值为概率差。 $s1\sim s6$ 的概率差相对较大。

图 4 是表 1 中数据的数据表示, 概率越大颜色越亮, 概率越小颜色越暗。从图 4 中可看出位于主对角线处的方块颜色相对亮, 而且在每行中能够直接分辨出导弹型号。从正确率和概率差两方面考虑的话, 该识别结果非常理想。



图 4 SAM 全波长识别概率的图像

Fig.4 Image of probability with SAM in all bands

2.2 数据的压缩与识别

根据公式(2)、(3), 设定阈值 $T=1$; $J(\lambda)$ 如图 5 所示。

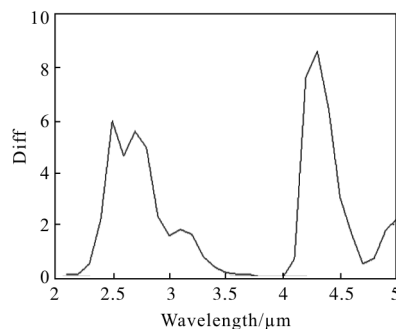


图 5 精度 0.1 μm 差值曲线

Fig.5 Difference of accuracy 0.1 μm

阈值越大,选择的波长个数会越少,波段范围越小,包含噪声越少;阈值越小,选择的波长个数越多,波长范围越大,包含噪声越多。

从图 5 可看出,压缩阈值等于 1 时,可光谱分 3 段,分别是 2.4~3.2 μm 、4.2~4.6 μm 、4.9~5 μm 。分别对压缩后的数据进行光谱角识别和模糊识别,结果如表 2 和图 6 所示,此处用 T 表示阈值,用 a 表示精度。

表 2 压缩后识别结果($T=1, a=0.1 \mu\text{m}$)

Tab.2 Recognized results after compression
($T=1, a=0.1 \mu\text{m}$)

| | y1 | y2 | y3 | y4 | y5 | y6 | |
|-------|----|-------|------|------|------|-------|------|
| SAM | s1 | 1.00 | 0.96 | 0.64 | 0.65 | 0.97 | 0.80 |
| | s2 | 0.95 | 0.99 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.95 |
| | s3 | 0.648 | 0.64 | 1.00 | 0.99 | 0.45 | 0.96 |
| | s4 | 0.73 | 0.88 | 0.99 | 0.99 | 0.551 | 0.98 |
| | s5 | 0.97 | 0.87 | 0.44 | 0.44 | 0.99 | 0.63 |
| | s6 | 0.77 | 0.91 | 0.97 | 0.97 | 0.60 | 0.99 |
| Fuzzy | s1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0.33 | 0.33 |
| | s2 | 0 | 0.67 | 0.33 | 0.33 | 0 | 0 |
| | s3 | 0 | 0.33 | 1 | 0.67 | 0 | 0 |
| | s4 | 0 | 0.33 | 0.33 | 0.67 | 0 | 0 |
| | s5 | 0.33 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.33 |
| | s6 | 0.33 | 0 | 0 | 0 | 0.33 | 0.67 |

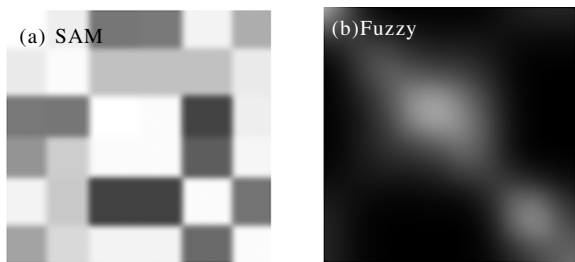


图 6 表 2 中概率的直观图

Fig.6 Image of probability corresponding to Tab.2

压缩后的 SAM 识别的正确率仍为 100%,且样本与各型相似度有一定距离,识别结果理想,这说明压缩后的数据一定程度上保留了光谱的特征信息。模糊识别的结果正确率也为 100%,与 SAM 结果相同,样本与各型相似度有一定距离,识别结果理想。从图 6 中可看出,使用压缩后的数据的识别结果的概率差比使用未压缩的数据的识别结果的概率差小,即其识别效果相比较差,但可以达到识别的目的。

3 实验分析

精度变化公式表示为:

$$f(\lambda) = \frac{f(\lambda) + f(\lambda + n/10)}{n} \quad (9)$$

式中: $f(\lambda)$ 为波长处的归一化辐射值; n 为积分精度与原始积分精度的倍数。精度为 0.2、0.4 μm 时, n 分别为 2、4。

基于图 2 和图 3 中的光谱数据, 分别改变光谱精度(积分步长)、阈值获得新数据,使用 SAM 和模糊识别的方法对新数据进行识别,并对结果做出分析。

表 3 是不同精度不同阈值的识别正确率, 其中 T 表示阈值, A 表示精度。表中包含 SAM 算法对全波长识别的正确率、压缩后的波段、压缩后使用 SAM 及 Fuzzy 算法识别的正确率。

表 3 不同精度不同阈值的识别正确率

Tab.3 Recognition accuracy of different precisions and different threshold values

| | SAM of all wavelength | SAM | Fuzzy | Selected bands/ μm |
|----------------|-----------------------|------|-------|-------------------------------|
| $T=1, A=0.2$ | 83% | 83% | 100% | 2.3-3.3 4.1-4.9 |
| $T=1, A=0.4$ | 83% | 83% | 83% | 2.1-3.6 4.1-4.8 |
| $T=0.5, A=0.1$ | 100% | 100% | 50% | 2.4-3.3 4.1-4.6 4.8-5 |
| $T=2, A=0.1$ | 100% | 100% | 100% | 2.4-2.9 4.2-4.5, 5 |

表 4 为相同条件下不同精度不同阈值的识别时间,从表中可知,全波段 SAM 识别所需时间最长,压缩后 SAM 识别所需时间相对有大幅度减少,压缩后的 Fuzzy 识别所需时间最短。

表 4 不同精度不同阈值的识别时间

Tab.4 Recognition time of different precisions and different threshold values

| | SAM of all wavelength/s | SAM/s | Fuzzy/s |
|----------------|-------------------------|-------|---------|
| $T=1, A=0.1$ | 0.305 | 0.208 | 0.015 |
| $T=1, A=0.2$ | 0.263 | 0.233 | 0.012 |
| $T=1, A=0.4$ | 0.272 | 0.252 | 0.012 |
| $T=0.5, A=0.1$ | 0.305 | 0.232 | 0.02 |
| $T=2, A=0.1$ | 0.305 | 0.219 | 0.021 |

表 5 包含不同精度不同阈值的识别结果直观图。

表 5 不同精度不同阈值的识别结果直观图

Tab.5 Recognition result visual images of different precisions and different threshold values

| | SAM of all wavelength | SAM | Fuzzy |
|--------------|-----------------------|-----|-------|
| T=1, A=0.2 | | | |
| T=1, A=0.4 | | | |
| T=0.5, A=0.1 | | | |
| T=2, A=0.1 | | | |

4 结 论

根据导弹尾焰光谱特性，设计出适用于尾焰识别的模糊算法，并根据库中导弹尾焰光谱绝对差值进行数据压缩，旨在提高数据运算效率。

通过改变光谱仪的积分精度和数据压缩的阈值，使用 SAM 和模糊算法对所得数据识别。对识别结果的分析可发现，精度和阈值的改变，两种方法是识别结果也会发生变化。文中分别取积分精度为 0.1、0.2、0.4 μm ，阈值分别为 0.5、1、2。根据 SAM 对全波长数据识别的结果可知，当精度为 0.1 μm 时，识别正确率为 100%，且样本与库中各光谱相似度差异明显，效果相对最佳；对于压缩后数据，仍以识别正确率和样本与库中各导弹相似度差异为衡量标准，光谱角测度的相对最佳积分精度为 0.1 μm ，阈值为 1，模糊算法的相对最佳积分精度为 0.2 μm ，阈值为 1。就复杂度和识别所需时间分析，模糊算法

数据处理要优于光谱角数据处理。

参考文献:

- [1] Xu Yanke, Yang Yan, Jing Zhanrong, et al. Analysis of how US defense support program (DSP) satellites to select the right waveband[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(4): 202–204.
- [2] Yurdanur–Tasel E, Berberoglu H, Bilikmen S. Investigation of materials of different crystal structure under various time delays using double pulse laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2012: 74–79.
- [3] Cai G B, Zhu D Q, Zhang X Y. Numerical simulation of the infrared radiative signatures of liquid and solid rocket plumes [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2007(11): 473–480.
- [4] Devir A, Lessin A, Lev M, et al. Comparison of calculated and measured radiation from a rocket motor plume [C]// AIAA, 2001:0358.
- [5] Qin Lanqi, Wang Hongyuan, Zhang Aihong, et al. Modeling and simulation of missile tail flame flow field characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (12): 3877–3882.(in Chinese)
- [6] Wang Darui, Zhang Nan. Measurement of engine tail flame flow field based on infrared technology of liquid rocket [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0204003. (in Chinese)
- [7] Wang J N, Gu X F, Ming T, et al. Classification and gradation rule for remote sensing satellite data products [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(3): 572–577.
- [8] Zhong Xiaojiao. Hyperspectral data, unmixing and spectral matching [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.(in Chinese)
- [9] Bai Jiwei. Research on spectral matching based on high spectral database [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
- [10] Chen Yang, Zhang Taining, Guo Peng, et al. Research on the method of complex spectral quantitative analysis based on principal component analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1285–1291. (in Chinese)
- [11] Huang Da, Huang Shucai. The characteristic spectrum in the image of the missile plume fuzzy recognition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2):0230002. (in Chinese)
- [12] Dong Yucui. Research on optimum band selection method for point target detection under specific background [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)