

基于连续投影算法提取特征波长的空中目标参考光谱选取

张运轲¹, 任登凤^{1*}, 韩玉阁¹, 李继源²

(1. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 空中目标在相对稳定的状态下具有确定的光谱辐射特性, 因而可以利用光谱达到识别其型号的目的。首先, 通过建立空中目标光谱辐射特性计算模型, 获得了其归一化光谱辐射亮度数据。然后, 利用连续投影算法对光谱进行特征波长提取, 在保留一定精度的同时有效减少了所需数据量。最后, 使用区分能力更强的混合光谱相似性测度 SID (TAN) 匹配光谱, 研究在 3~5 μm 波段和 8~14 μm 波段两个大气窗口内, 光谱辐射特性在不同飞行高度和飞行时间下的变化规律。结果表明: 飞行高度对光谱辐射特性的影响大于飞行时间; 3~5 μm 波段的变化较 8~14 μm 波段明显。因此在建立光谱数据库时, 为了提高识别的准确率, 相对于 8~14 μm 波段, 3~5 μm 波段更需要考虑不同因素对光谱辐射特性的影响; 相对于飞行时间, 应尽可能多地选取不同飞行高度下的光谱作为参考光谱。

关键词: 参考光谱; 特征波长; 连续投影算法; 混合光谱相似性测度; 光谱辐射特性
中图分类号: TN219 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200250

Air target reference spectrum selection based on characteristic wavelengths extracted by successive projections algorithm

Zhang Yunke¹, Ren Dengfeng^{1*}, Han Yuge¹, Li Jiyuan²

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Instrumentation and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Possessing certain spectral radiation characteristics in a relatively stable state, the air target can be identified according to its spectrum. At first, with the simulation model of air target spectral radiation, the spectral radiance was calculated. Secondly, successive projections algorithm was applied to extract the characteristic wavelengths from the simulation spectral data to reduce required data while retaining a certain accuracy. At last, the hybrid spectral similarity measure named SID (TAN) was involved in comparing the spectral radiation characteristics of different flying heights and flying time in 3-5 μm band and 8-14 μm band called dual atmospheric windows due to its stronger discrimination capability. The result shows that flying heights exert a greater effect on target spectral radiation characteristics than flying time. Meanwhile, changes in 3-5 μm band are more obvious than in 8-14 μm band. Therefore, aiming to improve the recognition accuracy, more factors are supposed to be considered in 3-5 μm band than in 8-14 μm . Compared with flying time, it is recommended to select more spectra of various flying heights as reference spectrum.

Key words: reference spectrum; characteristic wavelengths; successive projections algorithm; hybrid spectral similarity measure; spectral radiation characteristics

0 引言

当前搭载高光谱设备的天基探测系统的应用与发展对空中目标识别提出了新的要求^[1]。不同型号的飞行器因机身材料, 发动机种类, 飞行参数和环境等的不同, 其蒙皮、尾喷管和尾焰的光谱辐射特性各不相同, 各部件共同构成的整体光谱辐射特性也截然不同。但某一空中目标在相对稳定的状态下具有确定的光谱辐射特性^[2], 因而可以通过光谱达到识别其型号的目的。

基于匹配原理的光谱识别算法应用广泛, 它通过将探测到的测试光谱与光谱数据库中已知参考光谱进行对比分析来识别对象的类型。对参考光谱进行特征波长提取可以有效减少该类算法所需的时间; 同时, 作为识别的样本, 所选取的参考光谱是否具有代表性直接影响该类算法的正确率。因此, 特征波长的提取与参考光谱的选取对天基红外系统快速精准识别空中目标具有重要意义。

目前对空中目标光谱辐射特性的研究多集中于对 3~5 μm 波段尾焰的研究, 但天基探测到的通常是飞行器整体, 蒙皮与尾喷管同样是其红外辐射的重要来源, 不能被忽略; 用于提取空中目标光谱特征的方法主要有小波压缩、间隔偏最小二乘法和差异最大原则等, 所提取的特征光谱在一定程度上可以反应其光谱辐射特性, 但压缩程度有待提高; 由于数据获取的限制, 关于空中目标参考光谱选取的研究较少^[3-6]。

因为辐射在 3~5 μm 波段和 8~14 μm 波段两个大气窗口内的透过率较高, 所以文中的研究也集中于这两个波段。以整体为研究对象, 通过建立空中目标光谱辐射特性计算模型, 考虑其混合像元内地面背景和探测路径上大气的影 响, 获得了空中目标的光谱; 利用压缩性更好的连续投影算法 (SPA) 提取其特征波长, 使用区分能力更强的混合光谱相似性测度 SID (TAN) 匹配光谱, 建立了一套运算数据量更小、识别精确度更高的空中目标识别方法; 研究光谱辐射特性在不同飞行高度和飞行时间下的变化规律, 进而提出了不同飞行高度和飞行时间下参考光谱的选取原则。

1 空中目标光谱辐射特性仿真

通过仿真的方式获得研究所需的典型状态下空

中目标光谱。其中, 某型无人机记为 A, 另一某型隐身飞机用 B 表示。飞行器的主要辐射来源包括蒙皮、尾喷管和尾焰三部分, 在仿真时充分考虑了引起两者光谱辐射特性差异的多种因素, 如蒙皮与尾喷管表面的发射率, 尾焰的温度、压力与组分浓度等。

1.1 流场建模与计算

流场的建模与计算是获得空中目标光谱辐射特性的基础。建立长、宽、高为该方向上飞行器特征长度 10 倍左右的外流场, 将机身置于整个流场的 1/3 处。利用 ICEM CFD 对飞行器及其流域进行网格划分, 在机头、机翼和尾焰等流动变化较为剧烈的区域对网格进行加密, 经网格无关性验证, 最终确定 A、B 的网格数量分别在 1 500 万和 1 100 万左右。

流场使用 Fluent 计算, 对于蒙皮或尾喷管上的一面元, 综合考虑面元与相邻面元间的导热热量 Q_{con} , 面元自身辐射的热量 Q_{rad} , 面元的对流换热量 Q_{cv} , 面元吸收的太阳辐射和大气辐射热量 Q_{sun} 和 Q_{atm} , 使用节点网络法建立如公式 (1) 所示的热网络方程^[7]。

$$mc \frac{dT}{dt} = Q_{con} + Q_{rad} + Q_{cv} + Q_{sun} + Q_{atm} \quad (1)$$

式中: m 为面元的质量; c 为面元的比热容; T 为面元的温度。

湍流模型采用 SST k- ω 模型; 辐射模型采用离散坐标辐射模型, 正午和午夜的太阳辐射热流密度分别为 $1200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 方向垂直于机身上表面; 采用组分输运模型计算各物质组分浓度分布; 气体设为理想气体。

固体壁面采用无滑移速度边界条件, 内外流耦合壁面设为流-固耦合面, A 的发射率设为 0.8, B 的发射率设为 0.4。如图 1 所示, 外流域边界设为压力远

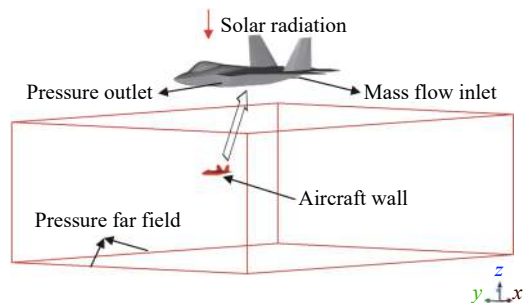


图 1 计算域和边界条件

Fig.1 Computation domain and boundary conditions

场边界, A 和 B 的巡航速度分别为 0.8 Ma 和 1.2 Ma, 迎角均为 0, 流动方向均沿机身纵轴方向; 5 km 高度处的压强和温度分别为 54028 Pa 和 255.5 K, 10 km 高度处的则分别为 26474 Pa 和 223 K。进气道入口设为

压力出口边界, 压强大小同周围大气压。飞行器尾喷口设为质量入口边界, 主流气体仅考虑 CO₂、H₂O、O₂ 和 N₂, 基于部件特性方法获得的尾喷口相关参数如表 1 所示。

表 1 尾喷口边界条件参数

Tab.1 Boundary condition parameters of nozzles

Parameters	Aircraft A		Aircraft B	
	Flying height of 5 km	Flying height of 10 km	Flying height of 5 km	Flying height of 10 km
T^*/K	736	653	1093	1012
p^*/Pa	249985	126009	495003	273214
Mole fractions	CO ₂	0.023	0.021	0.038
	H ₂ O	0.022	0.020	0.041
	O ₂	0.173	0.177	0.143

通过计算获得了 A、B 在 5 km 和 10 km 飞行高度下蒙皮和尾喷管的温度场, 尾焰的温度场、压力场、各组分浓度场。

1.2 光谱辐射特性建模

使用反向蒙特卡洛法对光谱辐射特性进行仿真^[8]。

空中目标探测示意图如图 2 所示。对于蒙皮与尾喷管的光谱辐射特性, 假设材料为灰体, 考虑自身辐射和反射的周围环境辐射, 采用公式 (2) 计算其表面的光谱辐射亮度。

$$L_{\lambda,wall} = L_{\lambda,self} + L_{\lambda,reflect} = L_{\lambda,self} + \left(\frac{\rho_{sun} L_{\lambda,sun} + \rho(L_{\lambda,atmosphere} + L_{\lambda,ground})}{\rho} \right) \quad (2)$$

式中: $L_{\lambda,self}$ 为蒙皮或尾喷管自身的辐射亮度; $L_{\lambda,reflect}$ 为其表面反射的环境的辐射亮度; ρ_{sun} 为蒙皮或尾喷管表面的太阳辐射反射率; $L_{\lambda,sun}$ 为投入的太阳辐射亮

度; ρ 为其表面的反射率; $L_{\lambda,atmosphere}$ 为投入的大气辐射亮度; $L_{\lambda,ground}$ 为投入的地面辐射亮度。

采用 C-G(Curtis-Godson) 近似法建立尾焰光谱辐射特性模型^[9], 如图 3 所示, 将尾焰沿探测点发射的随机射线划分为若干层, 认为每层内气体均匀分布, 仅考虑 CO₂ 和 H₂O 对其辐射的贡献^[10]; 当射线与 n 层气柱相交时, 从离探测点最远的气柱开始, 依次编号为 $i=1,2,\dots,n$, 当存在固体壁面时, 考虑尾焰对其衰减作用, 可以得到空中目标的光谱辐射亮度, 计算方法如公式 (3) 所示。

$$L_{\lambda} = (L_{\lambda,wall} \tau_{1\lambda} \tau_{2\lambda} \dots \tau_{n\lambda}) + L_{\lambda,plume} = (L_{\lambda,wall} \tau_{1\lambda} \tau_{2\lambda} \dots \tau_{n\lambda}) + (L_{bl}^1 (1-\tau_{1\lambda}) \tau_{2\lambda} \tau_{3\lambda} \dots \tau_{n\lambda} + \dots + L_{bl}^i (1-\tau_{i\lambda}) \tau_{(i+1)\lambda} \tau_{(i+2)\lambda} \dots \tau_{n\lambda} + \dots + L_{bl}^n (1-\tau_{n\lambda})) \quad (3)$$

式中: $\tau_{i\lambda}$ 为第 i 层气柱的光谱透过率; L_{bl}^i 为第 i 层气柱的黑体光谱辐射亮度。

在观测过程中, 探测器所接收到的空中目标光谱

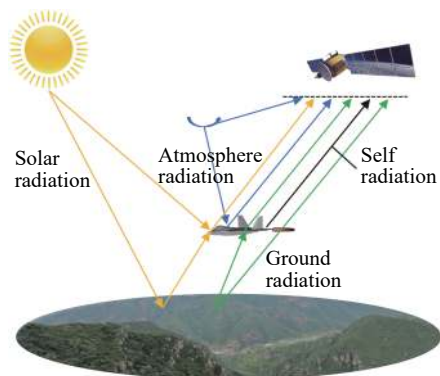


图 2 空中目标探测示意图

Fig.2 Schematic diagram of air target detection

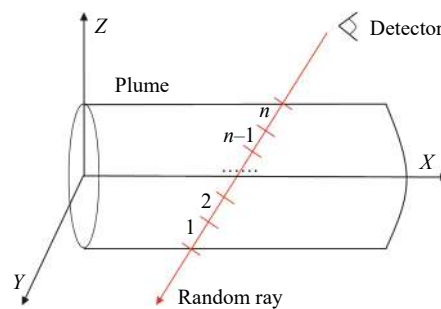


图 3 尾焰分层示意图

Fig.3 Layers of plume

辐射亮度信号,实际上是对探测点发射的被目标吸收的 N 条随机射线能量的平均,此外,对于天基高光谱探测器,还需要考虑其混合像元内背景和探测路径上大气的影响,采用公式 (4) 计算:

$$L_{\lambda, \text{detected}} = F \left(\frac{\tau_{\lambda}}{N} \sum_{i=1}^N L_{\lambda, i} \cos \theta_i + L_{\lambda, \text{path}} \right) + (1 - F) L_{\lambda, \text{background}} \quad (4)$$

式中: F 为混合像元内目标的空间占比; τ_{λ} 为大气透过率; N 为被目标吸收的射线总数; i 为随机射线的序号; $L_{\lambda, i}$ 为第 i 条射线的辐射亮度; θ_i 为第 i 条随机射线与探测平面法线的夹角,当探测点距离目标足够远时, $\cos \theta_i \approx 1$; $L_{\lambda, \text{path}}$ 为目标到达探测器路径上的大气辐射亮度; $L_{\lambda, \text{background}}$ 为混合像元内探测器接收到的地面背景辐射亮度。

使用目标的可见面积与其混合像元所代表的实际面积之比来计算 F ; τ_{λ} 和 $L_{\lambda, \text{path}}$ 直接使用 MODTRAN 计算获得, $L_{\lambda, \text{background}}$ 则使用 MODTRAN 结合实测的光谱反射率计算获得。

1.3 光谱辐射模型验证

为了验证所建立空中目标光谱辐射特性模型的正确性,采用该模型对参考文献 [11] 中实验的情况进行计算,并将计算结果与其测得的喷灯燃烧航空煤油的光谱辐射强度进行对比。

如图 4 所示,在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 波段,仿真光谱与实验光谱均在 $4.1\sim 4.4 \mu\text{m}$ 波段发出了强烈辐射,峰值位置大体相似,均出现在 $4.3 \mu\text{m}$ 波长附近,并且光谱形状具有很大的相似性。说明所使用的模型能够较好地给出该场景下空中目标的光谱辐射特性,可以用于不同

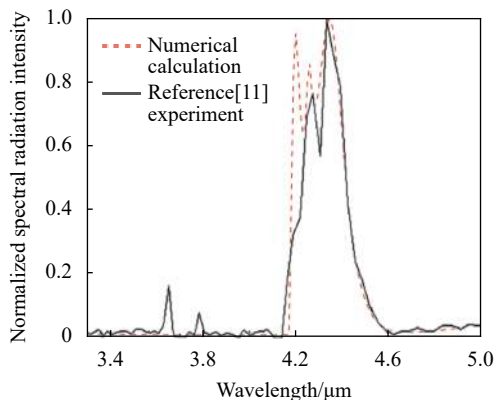


图 4 仿真与实验结果对比

Fig.4 Comparison of simulation and experimental results

场景下空中目标光谱辐射特性的预测。

1.4 光谱归一化处理

选择中纬度冬季大气类型,可见度为 5 km ,地表海拔为 30 m ,自定义草地作为地面反射;探测器的高度为 100 km ,俯角 θ 选取 $50^\circ, 70^\circ$ 和 90° ,方位角 φ 选取 $0^\circ, 90^\circ$ 和 180° ,如图 5 所示, θ 定义为视线在水平线以下时在铅垂面内与水平线所成的夹角,定义 φ 在机尾位置时为 0° ,在水平面内顺时针旋转至机头位置时为 180° ;探测器的空间分辨率为 30 m ^[12],则 A 和 B 的空间占比分别在 $[0.51, 0.64]$ 和 $[0.09, 0.11]$ 之间变化。

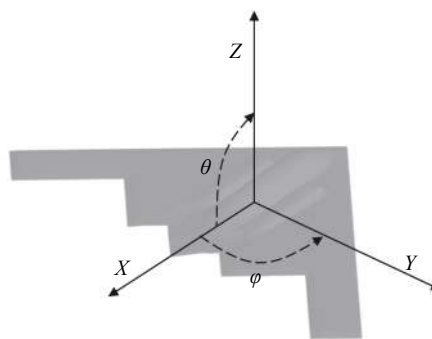


图 5 探测角度示意图

Fig.5 Schematic diagram of detection angles

图 6 所示为 B 在 5 km ,午夜,俯角 50° ,方位角 0° 情况下的光谱组成,上方光谱依次为目标本征辐射、大气透过率、路径辐射和地面背景辐射光谱,下方则为探测器接收到的空中目标光谱。

从图 6 中可以看出,虽然目标在 $4.3 \mu\text{m}$ 波长附近

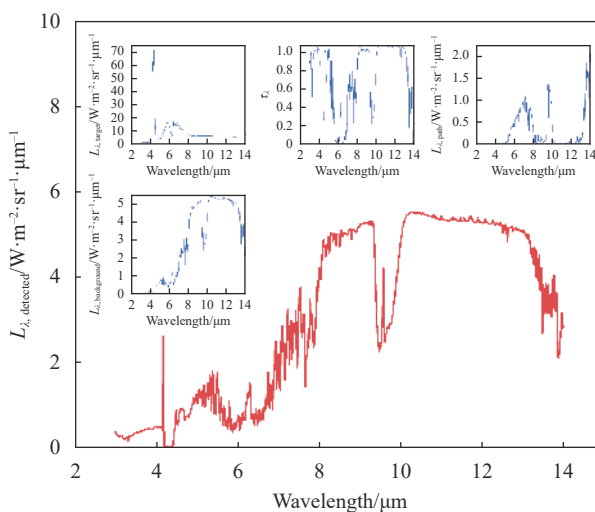


图 6 空中目标光谱组成

Fig.6 Composition of the air target spectrum

受到了强烈的大气衰减作用,但仍保留了部分明显特征;地面背景辐射和路径辐射主要位于 8~14 μm 波段,目标在此波段虽然保留了大部分特征,但是也会受其一定程度的影响。

考虑目标背景混合和大气传输的影响,通过仿真获得了 A、B 在 5 km 和 10 km 飞行高度,正午和午夜飞行时间,不同探测角度下,3~5 μm 波段和 8~14 μm 波段的光谱辐射亮度数据。

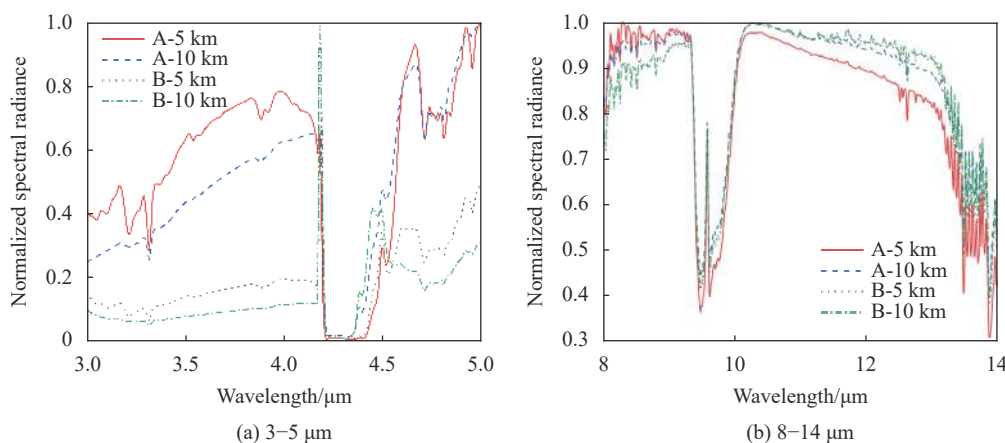


图 7 归一化光谱

Fig.7 Normalized spectra

为了与目标识别相适应,假设所有飞行时间为午夜,俯角为 50° 情况下的光谱作为参考光谱,建立 A 和 B 的光谱数据库;将其余光谱作为测试光谱。

2 混合光谱相似性测度 SID (TAN)

基于匹配原理的光谱识别算法依托光谱相似性测度对参考光谱与测试光谱进行比较与分析。目前已经发展出了多种光谱相似性测度^[13],现将广泛使用于高光谱地物识别中的基于光谱角匹配 (SAM) 和光谱信息散度 (SID) 的混合光谱相似性测度 SID (TAN) 应用于空中目标的光谱匹配中^[14],并使用相关光谱区分熵 (RSDE) 比较其与单一光谱相似性测度 SAM 和 SID 针对不同空中目标光谱区分能力的强弱。

2.1 SID (TAN) 计算方法

现介绍 SID (TAN) 计算方法如下,其中,测试光谱与参考光谱均可视为一个高维向量,假设测试光谱向量为 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, 参考光谱向量为 $\mathbf{y}=(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ 。

为了与目标识别相适应,文中所研究的光谱均为归一化光谱。归一化方法如公式 (5) 所示。

$$f'(\lambda) = \frac{f(\lambda)}{\max(f(\lambda))} \quad (5)$$

式中: f' 为归一化后的光谱; λ 为波长; f 为原始光谱。

图 7 所示为各空中目标在午夜,俯角 50°,方位角 0°,不同飞行高度情况下,3~5 μm 波段和 8~14 μm 波段的归一化光谱。

(1) 光谱角匹配

SAM 通过计算测试光谱向量与参考光谱向量间的夹角大小来描述两者之间的形状相似度,采用公式 (6) 计算:

$$SAM(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (6)$$

SAM 数值越接近 0, 表示测试光谱与参考光谱之间的形状越相似。

(2) 光谱信息散度

SID 将光谱向量看作随机变量,基于概率统计理论分析两个随机向量间的信息量相似度,计算方法如公式 (7) 所示:

$$SID(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = D(\mathbf{x} \parallel \mathbf{y}) + D(\mathbf{y} \parallel \mathbf{x}) \quad (7)$$

式中: $D(\mathbf{x} \parallel \mathbf{y})$ 为测试光谱关于参考光谱的相对熵; $D(\mathbf{y} \parallel \mathbf{x})$ 为参考光谱关于测试光谱的相对熵。

SID 数值越接近 0, 表示测试光谱与参考光谱之

间的信息量相似度越高。

(3) 混合光谱相似性测度 SID (TAN)

将上述 SAM 与 SID 相结合, 便可得到混合光谱相似性测度 SID (TAN), 计算方法如公式 (8) 所示:

$$SID(TAN)(x,y) = SID(x,y) \times \tan(SAM(x,y)) \quad (8)$$

SID (TAN) 数值越接近 0, 表示测试光谱与参考光谱之间的相似度越高。

2.2 相关光谱区分熵 (RSDE)

RSDE 是被用来定量比较各光谱相似性测度区分能力的评价标准, 其定义如公式 (9) 和公式 (10) 所示:

$$RSDE(t) = - \sum_{i=1}^n RSDPB(t, s_i) \times \lg[RSDPB(t, s_i)] \quad (9)$$

$$RSDPB(t, s_i) = m(t, s_i) / \sum_{i=1}^n m(t, s_i) \quad (10)$$

式中: t 为测试光谱向量; s_i 为参考光谱集 S 中的某一参考光谱向量; $RSDPB(t, s_i)$ 表示测试光谱关于参考光谱集的相对光谱区分概率; $m(t, s_i)$ 为需要评价的测度。

RSDE 数值越小, 不确定度越低, 测试光谱被正确识别的机率越大, 表示该光谱相似性测度的区分能力越强。

2.3 SID (TAN) 区分能力的评价

使用 RSDE 定量比较 SAM、SID 和 SID (TAN) 对空中目标光谱的区分能力。以典型光谱为例, 对比较结果进行说明: 选取 A、B 在两种飞行高度, 午夜, 俯角 50°, 方位角 0° 情况下的参考光谱, 简记为 A、B-5 km、10 km-午夜-俯角 50°-方位角 0°, 按照 A-5 km, A-10 km, B-5 km, B-10 km 的顺序, 依次标记为 s1, s2, s3 和 s4; 选取 A-10 km-午夜-俯角 70°-方位角 0° 的测试光谱, 对 A 进行识别。使用 SAM、SID 和 SID (TAN) 基于全波长得到的 RSDPB 和 RSDE 值分别列于表 2 中, 图 8 所示为获得的 RSDE 折线图。

可以看出: 在 3~5 μm 波段和 8~14 μm 波段, SID (TAN) 的 RSDE 值均是三种测度中最小的。这表明混合光谱相似性测度 SID (TAN) 针对不同空中目标的区分能力要强于其余两种单一光谱相似性测度 SAM 和 SID。

表 2 光谱相似性测度的相关光谱区分概率值和熵值 (×10⁻⁴)

Tab.2 Values of RSDPB and RSDE of spectral similarity measures (×10⁻⁴)

Wavelengths	Item	SAM	SID	SID (TAN)
3-5 μm	s1	1774	1698	635
	s2	197	20	0.8292
	s3	2741	1608	948
	s4	5287	6674	8416
	Entropy	4673	3810	2364
8-14 μm	s1	3696	5264	6168
	s2	972	331	102
	s3	2741	2388	2074
	s4	2591	2018	1656
	Entropy	5642	4844	4208

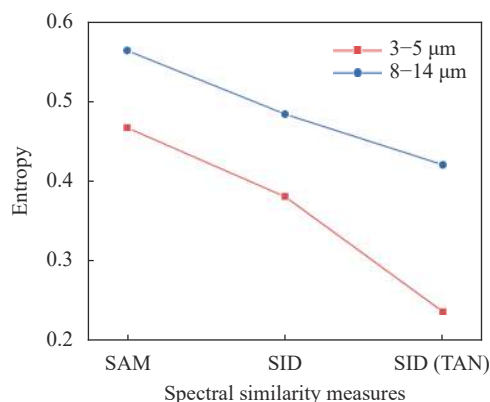


图 8 光谱相似性测度的相关光谱区分熵

Fig.8 RSDE of spectral similarity measures

3 基于连续投影算法的特征波长提取与验证

为了提高识别效率, 满足天基系统时限的要求, 还需使用 SPA 提取空中目标的特征波长。

3.1 基于 SPA 的特征波长提取

SPA 广泛应用于近红外光谱分析领域中, 精度较高^[15]。特征光谱库中的样本数 M 和波长数 K 可以组成一个光谱矩阵 $X_{M \times K}$, 记 $x_{k(0)}$ 和 N 分别为初始迭代向量和需要提取的波长个数。作为一种前向循环的变量选择方法, SPA 从一个波长开始, 在每次循环中计算其在未入选波长上的投影, 然后将投影向量最大的波长引入到波长组合中, 直至循环 N 次。每一个新

选入的波长,都与前一个线性关系最小。步骤如下:

(1) 初始化 $i=1$, 将第 j 列向量 \mathbf{x}_j 赋值给 $\mathbf{x}_{k(0)}$, 即 $k(0)=j$;

(2) 将剩余列向量所在位置的集合定义为 $S=\{j, 1 \leq j \leq K, j \notin \{k(0), \dots, k(i-1)\}\}$, 分别计算 $\mathbf{x}_{k(i-1)}$ 对剩余各列向量的投影向量:

$$P\mathbf{x}_j = \mathbf{x}_j - (\mathbf{x}_j^\top \mathbf{x}_{k(i-1)}) \mathbf{x}_{k(i-1)} (\mathbf{x}_{k(i-1)}^\top \mathbf{x}_{k(i-1)})^{-1}, j \in S \quad (11)$$

(3) 记录最大投影向量的序号:

$$k(i) = \arg(\max \|P\mathbf{x}_j\|, j \in S) \quad (12)$$

(4) 将最大投影作为下轮循环的投影向量:

$$\mathbf{x}_{k(i)} = P\mathbf{x}_j, j \in S \quad (13)$$

(5) 令 $i=i+1$, 如果 $i < N$, 回到 (2) 继续计算。

使用不同的 $k(0)$ 与 N 进行计算, 其中, $k(0)$ 和 N 的取值范围分别为 $[1, K]$ 和 $[1, M]$ 。每次循环结束后, 采用“留一交叉验证法”, 分别对每一对 $\mathbf{x}_{k(0)}$ 和 N 所决定的波长组合进行多元线性回归分析, 得到交

叉验证均方根误差 (RMSECV), 选取 RMSECV 最小的波长组合^[16]。

使用 SPA 对光谱数据库中的所有参考光谱进行特征波长提取, 最终, 在 3~5 μm 波段得到 10 条特征波长, 分别为: 3.162、3.216、4.08、4.179、4.188、4.197、4.377、4.44、4.548、4.953 μm ; 在 8~14 μm 波段得到 10 条特征波长, 分别为: 8.04、8.112、8.562、9.309、11.064、13.224、13.485、13.836、13.881、13.926 μm 。特征波长的分布如图 9 所示, 使用方框标记特征波长的位置。结合图 6 及其分析可得, 4.3 μm 波长附近为 CO_2 的主要吸收光带, 13.0 μm 波长附近为 CO_2 和 H_2O 的主要吸收光带, 尽管受到大气衰减的影响, 光谱曲线在这两个位置仍出现明显峰值, 理论上峰值位置的曲线包含更多的光谱信息; 其余特征波长则因归一化光谱之间存在明显的数值差异引起, 这主要是因为不同条件下蒙皮、尾喷管、背景以及大气的光谱辐射特性之间存在较大区别。

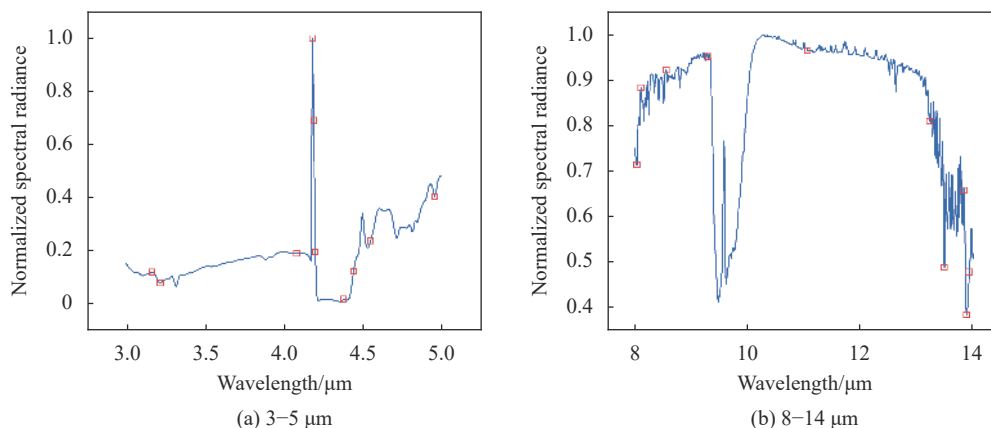


图 9 特征波长的分布

Fig.9 Distribution of characteristic wavelengths

3.2 基于 SPA 的特征波长验证

通过比较基于特征波长和全波长的光谱相似性测度值, 来对使用 SPA 提取的特征波长的有效性进行验证。以典型光谱为例, 对验证结果进行说明: 选取 A、B-5 km、10 km-午夜-俯角 50°-方位角 0°的参考光谱, 按照 A-5 km, A-10 km, B-5 km, B-10 km 的顺序依次标记为 s1, s2, s3 和 s4; 选取 A、B-5 km、10 km-午夜-俯角 70°-方位角 0°的测试光谱, 按照同样的顺序依次标记为 t1, t2, t3 和 t4, 对 A、B 进行识别。使用 SID (TAN) 计算各测试光谱与参考光谱分别基于

全波长和特征波长的相似性测度值。

表 3 和表 4 分别为测试光谱与参考光谱在两个波段基于特征波长和全波长的相似性测度值。从表中可以看出: 无论是 3~5 μm 波段, 还是 8~14 μm 波段, 基于特征波长的识别结果均与全波长相同; 并且同一测试光谱与各参考光谱间基于特征波长的相似性测度值与全波长相比, 具有相似的变化趋势和数值差距。例如, 当测试光谱为 t4 时, 从变化趋势上来说, 在两个波段内, 与 t4 同型号同高度的 s4 获得的相似性测度值均最小, 与 t4 同型号不同高度的

s3 的值次之, 而与 t4 不同型号的 s1、s2 的值均较大; 从数值上来说, 对于较为相似的光谱 s1 和 s2, s1 在 3~5 μm 波段基于特征波长的相似性测度值是 s2 的 0.8032/0.3075≈2.61 倍, 在 8~14 μm 波段为 12×10⁻⁴/

0.4315×10⁻⁴≈27.81 倍, 而基于全波长的这一比值则分别为 0.5994/0.2456≈2.44 倍和 2.5380×10⁻⁴/0.1251×10⁻⁴≈20.29 倍。

表 3 3~5 μm 波段特征波长与全波长下的光谱相似性测度值 (×10⁻⁴)

Tab.3 Spectral similarity values of characteristic wavelengths and full wavelengths in 3-5 μm band (×10⁻⁴)

Wavelengths	Item	t1	t2	t3	t4
Characteristic wavelengths	s1	0.6746	306	3 125	8 032
	s2	160	0.3761	1 568	3 075
	s3	1 584	1 062	12	655
	s4	4 839	1 970	131	7.344 1
Full wavelengths	s1	0.0968	80	1 051	5 994
	s2	54	0.1044	325	2 456
	s3	418	119	13	1 055
	s4	2 872	1 059	171	19

表 4 8~14 μm 波段特征波长与全波长下的光谱相似性测度值 (×10⁻⁴)

Tab.4 Spectral similarity values of characteristic wavelengths and full wavelengths in 8-14 μm band (×10⁻⁴)

Wavelengths	Item	t1	t2	t3	t4
Characteristic wavelengths	s1	0.0276	9.4809	7.9253	12
	s2	7.8953	0.0325	0.4322	0.4315
	s3	7.9513	1.785	0.0246	0.2363
	s4	13	0.7400	0.0088	0.0263
Full wavelengths	s1	0.0226	1.5345	1.8895	2.5380
	s2	1.1268	0.0253	0.1063	0.1251
	s3	2.0735	0.5161	0.0149	0.0536
	s4	2.5261	0.4121	0.0060	0.0157

上述结果说明使用 SPA 在 3~5 μm 波段和 8~14 μm 波段提取的特征波长均可以有效地反映空中目标光谱的特征信息, 并且在保留一定精度的同时, 所含数据量分别缩短为全波长的波长总数的 4.48% 和 1.50%, 可以有效减少识别所需时间。

4 基于特征波长的空中目标参考光谱选取

对空中目标光谱辐射特性在两种典型飞行高度 (5、10 km) 和两种典型飞行时间 (正午、午夜) 下的变化规律进行了研究, 进而提出了参考光谱的选取原则。

4.1 不同飞行高度下光谱辐射特性变化规律

以典型光谱为例, 对比较结果进行说明: 以 A、B-

5 km、10 km-午夜-俯角 50°, 即不同飞行高度下的光谱分别为参考光谱和测试光谱, 研究光谱辐射特性在不同飞行高度下的变化规律。得到的相同方位角下各测试光谱与参考光谱间的相似性测度值如表 5 所示。

表 5 光谱辐射特性在不同飞行高度下的变化 (×10⁻⁴)

Tab.5 Changes of spectral radiation characteristics at different flying heights (×10⁻⁴)

Wavelengths	Item	0°	90°	180°
3-5 μm	A	231	233	221
	B	317	302	297
8-14 μm	A	6.8735	6.4541	5.7993
	B	0.0403	0.0302	0.0318

对比不同波段的相似性测度值可以发现,飞行高度对 3~5 μm 波段光谱辐射特性的影响均大于 8~14 μm 波段,例如,当方位角为 0°时,A 在 3~5 μm 波段的值是 8~14 μm 波段的 $231 \times 10^{-4} / 6.8735 \times 10^{-4} \approx 33.61$ 倍。这主要是因为:

尾焰是 3~5 μm 波段辐射的主要来源之一,高度变化会改变尾焰的温度、压力、组分浓度分布,以及大气透过率。使光谱曲线波峰、波谷值及其中心波长

位置发生改变,光谱辐射特性变化较明显。以 A 为例,如图 10(a) 所示,其 10 km 波峰、波谷处的归一化值在 4.17 μm 前均小于 5 km,而在 4.17 μm 后整体上大于 5 km;且部分中心波长的位置发生了明显偏移。例如,图中使用圆圈标记的波峰的中心波长由 3.99 μm 偏移至 4.134 μm,偏移量为 0.144 μm,且其值减小了 $0.7844 - 0.6535 = 0.1309$ 。

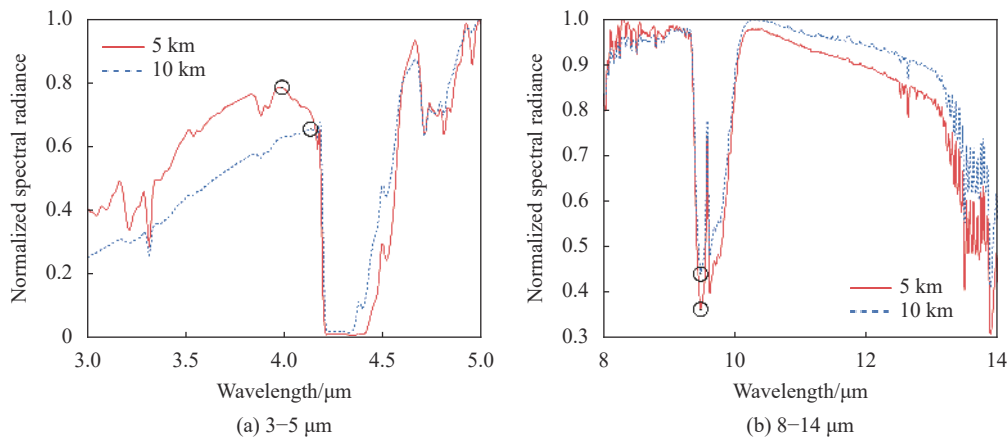


图 10 目标 A 在不同飞行高度下的归一化光谱

Fig.10 Normalized spectra of target A at different flying heights

蒙皮是 8~14 μm 波段辐射的主要来源之一,此外还受到背景与大气的影 响。高度变化使蒙皮的温度及背景辐射与路径辐射发生改变,但与尾焰相比,光谱辐射特性变化较小。同样以 A 为例,如图 10(b) 所示,其 10 km 波峰、波谷处的归一化值整体上大于 5 km,但中心波长位置并未发生偏移,光谱曲线线型变化程度较小。例如,图中标记的波谷的值虽然增大了 $0.4389 - 0.3612 = 0.0777$,但其中心波长并未发生偏移。

4.2 不同飞行时间下光谱辐射特性变化规律

以典型光谱为例,对比较结果进行说明:以 A、B-5 km-正午、午夜-俯角 50°,即不同飞行时间下的光谱分别为测试光谱和参考光谱,研究光谱辐射特性在不同飞行时间下的变化规律。

表 6 所示为相同方位角下各测试光谱与参考光谱间的相似性测度值,飞行时间对光谱辐射特性的影响较小,且主要影响 3~5 μm 波段,最大相似性测度值仅为 0.0105;并且对 8~14 μm 波段几乎没有影响,相似性测度值均趋于 0。

表 6 光谱辐射特性在不同飞行时间下的变化 ($\times 10^{-4}$)

Tab.6 Changes of spectral radiation characteristics at different flying time ($\times 10^{-4}$)

Wavelengths	Item	0°	90°	180°
3-5 μm	A	1.9966	2.9061	3.0677
	B	14	64	105
8-14 μm	A	0	0	0
	B	0.0002	0	0

这主要是因为太阳辐射的能量主要集中在 0.15~4 μm 波段,且目标蒙皮温度、地面背景辐射及大气路径辐射昼夜变化不大,对 8~14 μm 波段影响较小。以 A 为例,如图 11(a) 所示,太阳辐射仅使 3~4.2 μm 波段的部分波峰和波谷值增大,4.2~5 μm 的变化甚微;并且几乎没有改变其中心波长位置,光谱曲线线型变化不明显。例如,图中标记的波峰的值仅增大了 $0.8447 - 0.7844 = 0.0603$,其中心波长位置仅偏移了 $3.99 - 3.972 = 0.018 \mu\text{m}$ 。如图 11(b) 所示,太阳辐射仅使 8~14 μm 波段的光谱曲线微弱变化,几乎不改变其

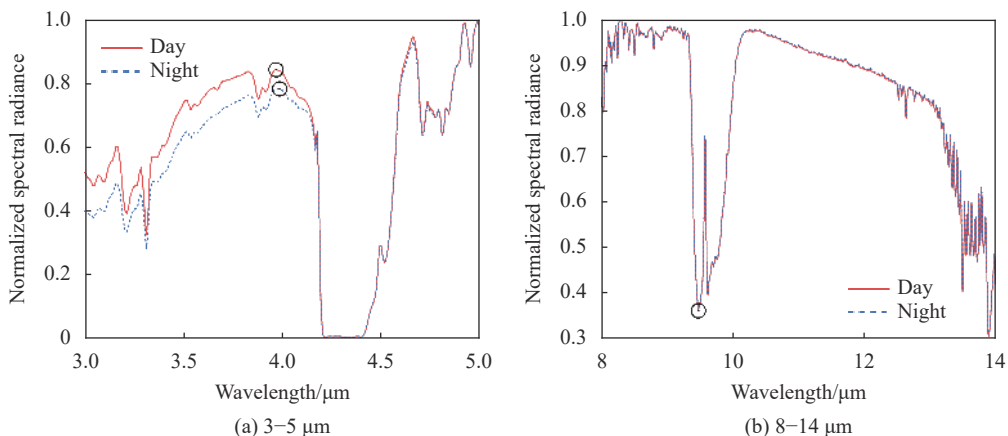


图 11 目标 A 在不同飞行时间下的归一化光谱

Fig.11 Normalized spectra of target A at different flying time

线型。例如,图中所标记的波谷的值仅减小了 $0.3612 - 0.3597 = 0.0015$, 仅为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的 2.49% 。

4.3 空中目标参考光谱选取

对比表 5 和表 6 可得,飞行高度对光谱辐射特性的影响大于飞行时间。例如,在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段,方位角为 0° ,空中目标为 A 时,前者的相似性测度值是后者的 $231 \times 10^{-4} / 1.9966 \times 10^{-4} \approx 115.70$ 倍。

由上述关于飞行高度和飞行时间对光谱辐射特性影响的研究可得:

飞行高度在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段对光谱辐射特性的影响大于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段;飞行时间主要影响 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的光谱辐射特性。因此,在建立光谱数据库时,为了提高识别准确率,相对于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段, $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段更需要考虑不同因素对光谱辐射特性的影响。

飞行高度对光谱辐射特性的影响大于飞行时间,与飞行高度相比,在一定程度上可以忽略飞行时间的影响。因此,在建立光谱数据库时,为了提高识别准确率,对于某一空中目标而言,应尽可能多地选取其在不同飞行高度下的光谱作为参考光谱。

5 结 论

文中通过建立空中目标光谱辐射特性计算模型,考虑其背景混合和大气传输的影响,获得了两型空中目标在不同飞行参数和探测角度下的归一化光谱辐射亮度数据。在此基础上,使用连续投影算法提取特征波长并利用混合光谱相似性测度 SID (TAN) 匹配光谱,研究了光谱辐射特性在不同飞行高度和飞行时间下的变化规律,进而提出了参考光谱的选取原则。

研究内容可为优化天基红外系统的识别能力提供理论参考。得到的主要结论如下。

(1) 使用 SPA 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段两个大气窗口内均提取了 10 条特征波长,数据量仅为全波长的波长总数的 4.48% 和 1.50% ;基于特征波长的识别结果均与全波长相同,且各相似性测度值间的差距均与全波长相似,在效率和准确度上均可以满足天基系统快速识别的要求。

(2) 飞行高度在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段对光谱辐射特性的影响大于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段,相似性测度值之比可达 33.61 倍;飞行时间主要影响 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的光谱辐射特性,对 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段几乎无影响;飞行高度对光谱辐射特性的影响大于飞行时间,相似性测度值之比可达 115.70 倍。

(3) 为了提高识别准确率,在建立光谱数据库时,相对于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段, $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段更需要考虑不同因素对光谱辐射特性的影响;同时,相对于飞行时间,应尽可能多地选取不同飞行高度下的光谱作为参考光谱。

参考文献:

[1] Tang Shaofan, Lu Zhijun, Wang Weigang, et al. Brief description of space hyperspectral imager(invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0303003. (in Chinese)

[2] Huang Da, Huang Shucai, Tang Yidong, et al. Application of fuzzy recognition algorithm in the spectrum identification of missile tail flame [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0704002. (in Chinese)

- [3] Zhang Haixin, Zhang Zhenglong, Li Xiaoqi, et al. High-Speed parallel implementation of spectral refinement in infrared fourier spectrometer [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(7): 599-604. (in Chinese)
- [4] Yuan Zhiwei, Huang Shucai, Xiong Zhigang, et al. Application of characteristic plume spectra in recognition of boost phase ballistic target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 306-313. (in Chinese)
- [5] Huang Da, Huang Shucai, Zhao Wei, et al. Selection of feature bands based on space-based detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(S1): S117005. (in Chinese)
- [6] Wang Yanming, Tan Heping, Shuai Yong, et al. Compressing infrared radiative characteristics of exhaust plume by wavelets [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(1): 127-129. (in Chinese)
- [7] Li Shenbo, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, et al. Study on the infrared radiation characteristics of the aircraft airframe [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(7): 739-744. (in Chinese)
- [8] Gao Xiang. Investigation on the infrared radiation and radar scattering characteristics of aircraft and engine[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese).
- [9] Li N, Lv Z, Huai W, et al. A simulation method of aircraft plumes for real-time imaging [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 77: 153-161.
- [10] Ludwig C B, Malkmus W, Reardon J E, et al. Handbook of infrared radiation from combustion gases[R]. NASA SP-3080, 1973.
- [11] Zong Jingguo, Zhang Jianqi, Liu Delian. Infrared radiation characteristics of the stealth aircraft [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(2): 289-294. (in Chinese)
- [12] Hu Jianming, Qiao Kai, Zhi Xiyang, et al. Influence of complex environment on the detectability of weak and small aerial target under space-based observation mode [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(3): 351-357. (in Chinese)
- [13] Ghiyamat A, Shafri H Z M, Mahdiraji G A, et al. Hyperspectral discrimination of tree species with different classifications using single-and multiple-endmember [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 177-191.
- [14] Du Y, Chang C I, Ren H, et al. New hyperspectral discrimination measure for spectral characterization [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(8): 1777-1787.
- [15] Soares S F C, Gomes A A, Araujo M C U, et al. The successive projections algorithm [J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2013, 42: 84-98.
- [16] Cheng Zhong, Zhang Liqing, Liu Heyang, et al. Successive projections algorithm and its application to selecting the wheat near-infrared spectral variables [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 949-952. (in Chinese)



第一作者简介：张运轲(1996-),男,硕士。2018年于中国矿业大学过程装备与控制工程专业获工学学士学位,2021年于南京理工大学工程热物理专业获工学硕士学位。主要研究方向为目标红外辐射特性数值模拟、目标特征提取与识别。