

尾焰特征光谱在主动段弹道目标识别中的应用

苑智玮, 黄树彩, 熊志刚, 赵 炜

空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051

摘要 天基红外预警卫星远距离探测时获取的弹道目标特征信息匮乏, 代表物质固有属性差异的光谱信息可作为目标识别的主要依据。将尾焰特征光谱信息作为识别的重要手段, 综合考虑尾焰光谱吸收特性和特征光谱提取原则, 采用改进的向前和向后间隔偏最小二乘法建立特征波段提取模型, 以新型自适应变权重光谱相似性测度 (SAVM) 实现目标与特征光谱数据库的匹配, 提出了基于尾焰特征光谱的主动段弹道目标识别方法。仿真实验进行了特征波段提取与 SAVM 优越性的验证, 相较于全波段光谱匹配识别法, 提出的方法所需数据量更小、识别精度更高。研究内容可为红外预警卫星系统优化探测识别能力提供有意义的参考。

关键词 光谱学; 红外预警卫星; 目标识别; 特征光谱; 相似性测度

中图分类号 V19 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0230001

Application of Characteristic Plume Spectra in Recognition of Boost Phase Ballistic Target

Yuan Zhiwei, Huang Shucai, Xiong Zhigang, Zhao Wei

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

Abstract The feature information of ballistic target is deficient in space based infrared system. Spectrum represents the inherent property difference of the object, which can be used as main gist for target recognition. The characteristic spectra of missile plume are taken as an important mean for target recognition. Considering the spectral absorption characteristics and the band extraction rules, we construct a band extraction model using forward and backward interval partial least squares, use to a new spectral adaptive varied weight measure (SAVM) distinguish, and propose a new recognition method based on characteristic plume spectra, which can be used for the recognition of boost phase ballistic target. The characteristic bands are extracted and SAVM superiority is verified. The method proposed needs less data, provides higher precision and can be a better reference for optimizing infrared detection and recognition system in comparison with the way of using whole spectral range.

Key words spectroscopy; infrared warning satellites; target recognition; characteristic spectra; similarity measure

OCIS codes 300.3700; 300.6340; 040.3060; 280.2470

1 引 言

天基红外预警系统^[1]通过红外预警卫星实现以弹道导弹为主的弹道目标探测。弹道导弹按预定程序飞行时,在推进剂燃烧剧烈的主动段飞行过程会发出强烈的红外辐射,可为红外预警卫星提供目标信息。在探测过程中,快速准确检测并识别来袭弹道目标是红外预警卫星的工作重点,若能在距离发射时刻更近的主动段实现弹道目标的准确识别,可有效提升红外预警卫星工作效能,增加后续反导拦截的预警时间。但是远距离目标观测中(如高轨卫星)目标特征信息的提取十分困难,往往仅能获得单个点的灰度和位置等信息,这无疑为天基弹道目标的观测识别增加了难度。现有的针对主动段弹道目标识别的研究多是以宽带红外成像为

收稿日期: 2016-08-04; **收到修改稿日期:** 2016-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(61573374, 61503408)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2012JM8020)、航空科学基金(20130196004)

作者简介: 苑智玮(1993—),男,硕士研究生,主要从事红外目标检测与识别方面的研究。E-mail: YuanzhiweiSachiel@163.com

导师简介: 黄树彩(1967—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事空天拦截器引导与仿真方面的研究。
E-mail: hsc67118@126.com

基础,通过融合目标的灰度信息和运动信息^[2-5]与已建立好的标准弹道模板数据库进行目标匹配识别,这类方法需要目标灰度与运动特性匹配数据库的支持,数据规模巨大。在实际应用中,依靠如此有限的信息量仅能实现目标的粗分类,远距离探测时会带来较大误判率。将光谱特征信息运用到目标识别领域可增加目标的信息维,与空间和时间特征信息不同,光谱信息是物质的本质属性,具有类似指纹特征的唯一性、独立性和稳定性等特点,不同型号导弹的尾焰光谱因发动机、燃料添加剂、飞行参数以及环境的差异而有很大差别,因而代表尾焰成分固有属性差异的红外光谱特征信息可以作为主动段弹道目标识别的一种重要手段^[6]。为充分利用尾焰光谱信息,使其在实现目标探测的基础上进一步满足识别需要,须使提取的尾焰光谱同时满足光谱结构精细和光谱图像数据量小这两点要求。随着窄带滤光技术^[7]的实现,上述条件均可满足,通过提取复杂背景杂散光谱中导弹尾焰的窄带线状光谱,使基于光谱信息的目标识别成为可能。当前,尾焰光谱信息在目标探测领域应用较多,文献^[8-9]依据尾焰光谱的双峰辐射特性确定了红外预警卫星的探测波段;在识别领域中,文献^[10]以尾焰红外辐射双峰对应波长为光谱特征信息识别导弹型号,但该方法采用的特征信息少,只对谱线差异大的尾焰光谱有效,且仅依靠目标与相应参考库的光谱误差为匹配精度指标,匹配精度不高;文献^[2,7]对光谱识别技术的探讨尚停留在发展方向和趋势的讨论,基于尾焰光谱特性的目标识别仍缺乏具有针对性的波段选择方法及匹配识别算法,相关问题还有待深入研究。

本文针对红外预警卫星对弹道目标识别困难的问题,通过融合光谱信息,建立尾焰特征光谱提取模型,将观测结果与特征光谱库进行匹配识别,同时提出了匹配精度更高的自适应变权重光谱相似性测度(SAVM),最终形成一套运算数据量小、识别精确度高的主动段弹道目标识别方法。该项研究可为红外预警卫星系统优化探测识别能力提供有意义的参考,为后续的反导拦截提供充足的预警时间,从而提升作战效能。

2 主动段弹道目标尾焰特征光谱提取与识别理论建模

2.1 尾焰光谱特性与特征光谱提取原则

真实弹道导弹尾焰的红外辐射数据很难获取,现有的研究多采用建模与仿真的方法进行计算^[11-12]。尾焰红外辐射特性受多种因素影响,其中光谱吸收特性对光谱曲线的影响最为关键,在计算过程中,混合气体组分、温度和压强等因素可在较大程度上改变光谱吸收特性。经过大量计算发现:温度的变化可导致谱线强度发生较大变化;而压强通过改变谱线密度间接影响谱线强度,对谱线波峰波谷位置中心波长和线型影响较小;组分差异能改变谱线主次吸收峰间的比例关系,使光谱线型发生显著变化。由于预警卫星对目标探测的积分时间相对于整个主动段飞行时间很短,为了方便观察和比较,认为导弹尾焰在相对稳定的状态下燃烧(即尾焰气体组分保持不变),故在相同的温度和压强条件下,同一型号导弹尾焰燃烧气体组分恒定,具有唯一的红外辐射指纹特性。

下面研究气体组分为单一变量的混合气体吸收系数光谱。根据文献^[11-12]中的参数设定,计算温度、压强以及气体组分等16种不同的混合气体吸收系数光谱,其中气体成分考虑二氧化碳和水蒸气这两种最主要的辐射气体,图1为各类混合气体标准化后的光谱曲线,光谱范围为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$,光谱分辨率为 $1\ \text{cm}^{-1}$ 。由于二氧化碳气体出现强吸收带的位置在 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 附近,水蒸气的强吸收带位置为 $2.7\ \mu\text{m}$ 附近,图1

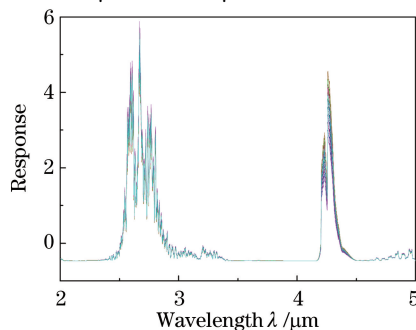


图1 16种混合气体标准化后的吸收系数光谱

Fig. 1 Normalized absorption coefficient spectra of 16 kinds of mixed gas

中各谱线在 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 处均出现明显的吸收峰,但峰值大小各异,从理论上说,峰值位置处的吸收光谱包含更多的光谱信息,相反,各谱线在剩余位置的谱线共线性较强,不能反映谱线间的光谱特征差异。

在光谱分析方法的研究中,特征光谱的提取应视应用场合的不同而定,所用特征不同,提取特征的方法也不同^[13]。为实现弹道目标的准确识别,提取特征光谱旨在去除全波段中光谱信息量少、共线性强的位置,使其能够最大程度地反映光谱间的特征差异。为满足上述要求,同时结合红外预警卫星的工作实际,下面给出特征波段选择应遵循的几点原则:

- 1) 在所选波段组合中,光谱间的特征差异要明显;
- 2) 在所选的波段内,目标的光谱信息量要大;
- 3) 所选的各波段间的相关性要小,避免数据冗余;
- 4) 保证探测器在所选波段内对目标探测的有效性。

2.2 基于改进的向前和向后间隔偏最小二乘法的尾焰特征光谱提取模型

向前间隔偏最小二乘法(FiPLS)和向后间隔偏最小二乘法(BiPLS)是近红外光谱分析领域中常用的波长变量选择方法,多用于模型预测,精度较高,但这两种方法的贪婪搜索特性较强,提取的波段不能很好地反映待测成分的信息。瞿芳芳等^[13]提出基于二者组合策略的向前和向后间隔偏最小二乘(FB-iPLS)方法可实现对目标特征波段的双向选择,提高了模型的稳健性。依据波段提取的需要改进了该方法,具体步骤如下:

1) 在光谱范围内的每一数据点上建立偏最小二乘回归模型,以各模型的均方根误差(RMSECV)值作为光谱特征差异指标(数值越大差异越大),取 RMSECV 中最大的前 t 个数值对应的数据点为潜在特征波长点;

2) 将全光谱区域等分成 n 个子区间,将潜在特征波长点所在子区间标记为候选子区间;

3) 计算各局部模型的 RMSECV 值,取 RMSECV 值最大的局部模型为向前间隔偏最小二乘的第一子模型,所在子区间则为第一入选区间;每次去掉 1 个子区间,在剩余的 $n-1$ 个联合区间进行偏最小二乘回归,比较各联合模型的 RMSECV 值,取值最大的联合模型所移除的子区间为第一去掉区间;

4) 确定余下子区间数目。若第一入选区间与第一去掉区间相同,余下子区间为 $n-1$ 个;若不同,则为 $n-2$;

5) 按照步骤 3) 方法确定各自的下一子模型,直至余下子区间数目不足以继续运行该过程(余下子区间个数小于 2);

6) 确定向前和向后间隔偏最小二乘模型中 RMSECV 值最大的模型,模型包含的多个子区间对应的波段即为特征波段。

2.3 自适应变权重光谱相似性测度

采用上述模型获得的特征光谱能够最大程度地表征不同目标间的光谱特征差异,下一步需要利用光谱相似性测度进行基于特征光谱的弹道目标匹配识别。由于导弹尾焰气体辐射特性主要受高温高压条件下二氧化碳和水蒸气的影响,其在特定波段的谱线会表现出一定程度的相似性,尾焰气体组分越接近,这种相似性表现得越为明显,若只采用单一相似性测度判别会造成较大程度的误判,因此需要采用更加精确的相似性判别方法。本文结合多个光谱相似性指标,提出一种能够根据匹配对象间的差异特点自动调整权重系数的新型光谱相似性测度,即 SAVM。下面分别介绍 SAVM 所涉及的相似性指标,并给出其表达式。

设 $\mathbf{I}_i = (I_{i1}, I_{i2}, \dots, I_{iN})^T$ 和 $\mathbf{I}_j = (I_{j1}, I_{j2}, \dots, I_{jN})^T$ 分别为目标红外辐射特征光谱数据和与之相匹配的特征光谱库的光谱数据, $\mathbf{r}_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iN})^T$ 和 $\mathbf{r}_j = (r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{jN})^T$ 分别为相应谱线标准化后的响应值, N 为特征光谱波段数, $k=1, 2, \dots, N$, r_{ik} 为光谱 \mathbf{I}_i 在第 k 个波段的响应值。

1) 距离相似性测度(SBD)

距离相似性测度可描述两光谱矢量间的几何距离,常用的表征二者光谱矢量差异的数学表达方法为欧氏距离函数^[14-15]

$$V_{\text{SBD}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (r_{ik} - r_{jk})^2}{N}}, \quad (1)$$

式中 N 为波段数, $V_{\text{SBD}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$ 表示用于匹配的两光谱矢量的距离相似性测度值, 取值范围为 $[0, 1]$, 数值越小, 距离相似程度越大。

2) 线型相似性测度 (SSD)

光谱曲线形状差异可由皮尔森相关系数^[16]表示, 其数学表达式为

$$V_{\text{SCM}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \frac{\sum_{k=1}^N (r_{ik} - \bar{r}_i)(r_{jk} - \bar{r}_j)}{\left[\sum_{k=1}^N (r_{ik} - \bar{r}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{k=1}^N (r_{jk} - \bar{r}_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

其取值在 $[-1, 1]$ 之间, 其绝对值越大表示光谱线型越相似。光谱线型相似性测度表示为

$$V_{\text{SSD}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \left[\frac{1 - V_{\text{SCM}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)}{2} \right]^2, \quad (3)$$

其取值范围为 $[0, 1]$, 数值越小, 线型相似程度越大。

3) 信息量相似性测度 (SID)

光谱信息量相似性测度是以信息论角度考虑的一种相似性测度, 可通过光谱信息散度表征待匹配光谱间的信息量差异^[17], SID 表达式为

$$V_{\text{SID}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = D(\mathbf{r}_i \parallel \mathbf{r}_j) + D(\mathbf{r}_j \parallel \mathbf{r}_i), \quad (4)$$

式中 $D(\mathbf{r}_i \parallel \mathbf{r}_j)$ 和 $D(\mathbf{r}_j \parallel \mathbf{r}_i)$ 分别为光谱 \mathbf{r}_i 关于 \mathbf{r}_j 和光谱 \mathbf{r}_j 关于 \mathbf{r}_i 的相对熵。

$$\begin{aligned} D(\mathbf{r}_i \parallel \mathbf{r}_j) &= \sum_{k=1}^N p_{ik} D_k(r_{ik} \parallel r_{jk}) = \sum_{k=1}^N p_{ik} [I(r_{ik}) - I(r_{jk})] \\ D(\mathbf{r}_j \parallel \mathbf{r}_i) &= \sum_{k=1}^N p_{jk} D_k(r_{jk} \parallel r_{ik}) = \sum_{k=1}^N p_{jk} [I(r_{jk}) - I(r_{ik})], \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $I(r_{ik})$ 为光谱 \mathbf{r}_i 在第 k 个波段的自信息, $I(r_{ik}) = -\lg p_{ik}$; p_{ik} 为光谱 \mathbf{r}_i 在第 k 个波段的概率, $p_{ik} = r_{ik} / \sum_{n=1}^N r_{in}$ 。同理, $I(r_{jk}) = -\lg p_{jk}$, $p_{jk} = r_{jk} / \sum_{n=1}^N r_{jn}$ 。

为融合上述各相似性测度, 提出 SAVM 数学模型为

$$V_{\text{SAVM}} = xV_{\text{SBD}} + yV_{\text{SSD}} + zV_{\text{SID}}. \quad (6)$$

该模型可以将光谱的距离相似性测度、线型相似性测度和信息量相似性测度按照一定权重进行融合, 形成较为全面的相似性测度函数。(6) 式中 x, y, z 分别为上述测度相应的自适应权重, 权重系数由各测度的变异系数求得, 计算公式为

$$\begin{cases} \frac{T_{\text{SBD}}}{x} = \frac{T_{\text{SSD}}}{y} = \frac{T_{\text{SID}}}{z}, \\ x + y + z = 1 \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $T_{\text{SBD}}, T_{\text{SSD}}, T_{\text{SID}}$ 分别为相应各测度在全波段范围内的变异系数, 表示两光谱数据间的变异程度, 采用标准差与平均数的比值计算, 可求得 x, y, z 。结合主动段弹道目标尾焰特征光谱提取模型和识别模型可以实现主动段弹道目标的识别, 算法的流程图如图 2 所示。

3 特征光谱提取与识别验证

为减少模型计算量, 首先要针对上述模型设定合理的采样数值 t 进行候选特征谱段的提取。波段中每一数据点的 RMSECV 值随波长变化曲线如图 3(a) 所示, 数值分布呈现出明显的两极化趋势, $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 附近数值较大, 其余波段数值较小, 若以 RMSECV 值为 0.04 为界可近似区分二者; 将全光谱的 RMSECV 值按从大到小顺序排列, 变化趋势如图 3(b) 所示, 可以发现曲线在 RMSECV 值为 0.04 附近下降速度减缓。故选取 RMSECV 值为 0.04 作为分界阈值, 此时对应的 $t = 438$, 取出 RMSECV 中最大的前 438 个数值对应的数据点为潜在特征波长点, 具体数值为 $2.533 \sim 2.536 \mu\text{m}$ 、 $2.539 \sim 2.840 \mu\text{m}$ 、 $2.850 \sim$

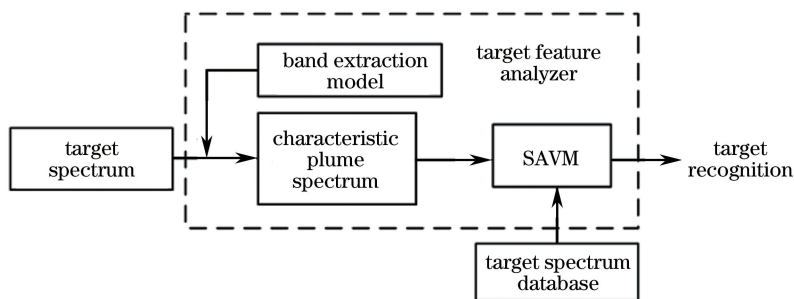


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the proposed method

2.854 μm 、2.856~2.857 μm 、4.203~4.333 μm 。这些潜在特征波长点均集中光谱信息量在 2.7 μm 和 4.3 μm 附近,满足特征光谱提取原则要求,潜在特征波长点分布如图 4 所示。

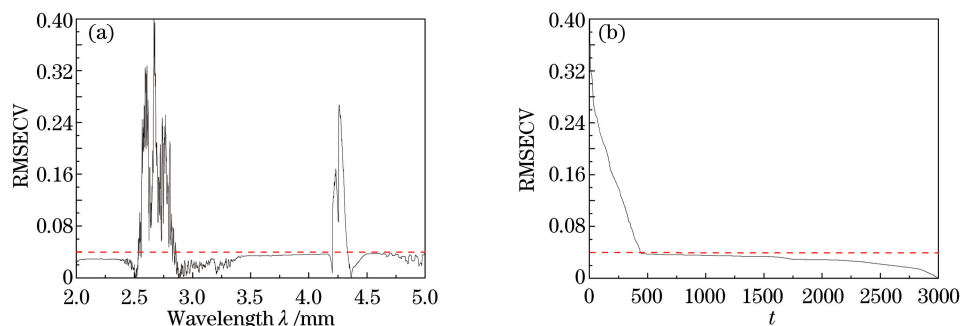


图 3 (a) RMSECV 随波长分布曲线; (b) RMSECV 按数值大小排列曲线

Fig. 3 (a) Distribution curve of RMSECV with wavelength; (b) curve with sorted RMSECV value

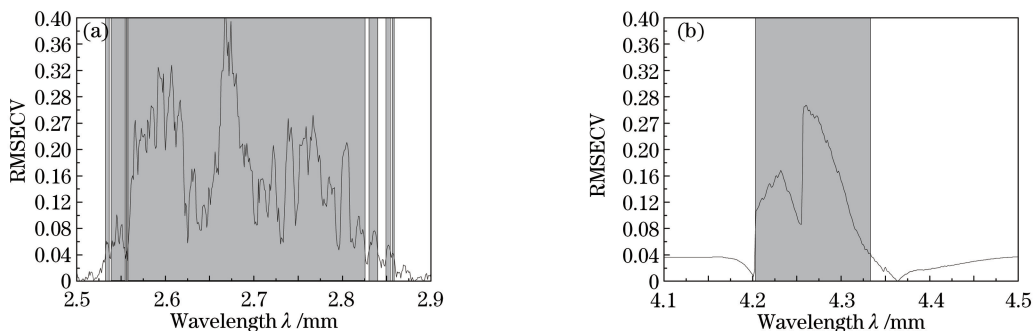


图 4 (a) 2.7 μm 和 (b) 4.3 μm 附近潜在特征波长点分布

Fig. 4 Distribution of the potential characteristic wavelength point around (a) 2.7 μm and (b) 4.3 μm

潜在特征波长点所在子区间为模型的候选子区间,它随子区间个数 n 的不同而有所差异。此外,不同的子区间个数 n 会对模型精度指标 RMSECV 的值产生重要影响, n 值过小,算法近似为对全光谱计算的普通最小二乘算法; n 值过大,会严重增大模型的数据运算量。表 1 为不同大小的子区间与 RMSECV 值的变化关系,描述当 n 值在 200~600 范围内变化时对特征波段选择精度的影响。从表 1 可以看出, RMSECV 在 $n=500$ 时达到最大,其值为 5.0885,此时模型的候选子区间为第 89~140,142,143,368~389 个子区间。下面计算改进向前和向后间隔偏最小二乘模型中 RMSECV 值最大的模型,模型包含的多个子区间为第 111, 92,113,379,112,104 个子区间,图 5 中将这子区间标识出来。对应的特征波段确定为: 2.547~2.552 μm , 2.619~2.624 μm , 2.661~2.666 μm , 2.667~2.672 μm , 2.673~2.678 μm 和 4.269~4.274 μm 。此时子区间间隔下的波段带宽为 6 nm,波段组合具有非连续性,故可在一定程度上减少数据冗余。

为保证红外预警卫星探测器在特征波段内对目标实现有效探测,采用基于电子数的信噪比(SNR)模型^[18]进行特征波段的合理性验证,按照美国国防支援计划预警卫星参数设定,计算15km高度处某型导弹^[12]在特

表 1 不同子区间下的 RESECV 数值

Table 1 RESECV value for different number of intervals

Interval number	200	250	300	375	500	600	700
RMSECV	2.3429	2.9440	3.5574	4.3288	5.0885	4.9313	4.9562

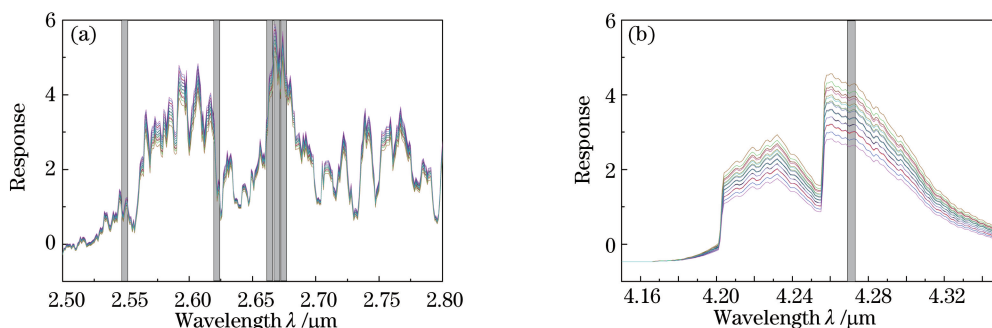


图 5 特征波段在 (a) 2.7 μm 附近和 (b) 4.3 μm 附近的分布

Fig. 5 Distribution of the characteristic bands around (a) 2.7 μm and (b) 4.3 μm

征波段处的 SNR 分别为 4.232, 9.145, 12.02, 10.57, 8.362, 1.277。若战术上设定检测概率 $P_d \geq 99\%$, 虚警概率 $P_{fa} \leq 10^{-3}$, 此时的波段组合中部分波段的 SNR 数值能够满足单帧不小于 6.04 的最低要求^[18]。

下面从分类识别角度说明所提取波段的合理性。图 4 为公开文献中的 4 种型号弹道导弹^[12,19-20] 归一化的尾焰光谱数据, 表 2 包含全光谱波段和特征光谱波段下不同类型的综合相似性测度值, 分别为: 包含同样三种测度指标的光谱泛相似性测度 (SPM)^[17]、考虑光谱距离和线型的变权重组合光谱相似性测度 (SCWM)^[21] 以及 SAVM。可以看出, 对于任意两型光谱、任意综合测度的匹配, 以特征波段计算的测度值都更大, 说明在特征波段处的光谱曲线更能反映光谱特征差异, 相较于全波段的谱线更容易区分不同类型的尾焰光谱。基于特征光谱的光谱匹配与全波段法相比, 所需数据量更小, 仅为全波段法所需数据量的 12%。

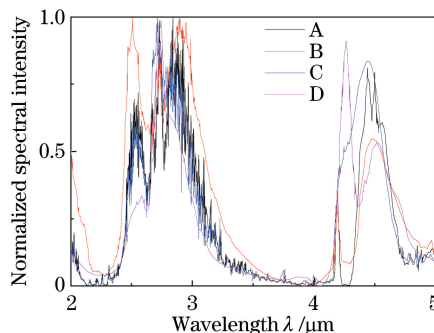


图 6 4 种型号弹道导弹归一化的光谱辐射强度曲线

Fig. 6 Normalized spectral intensity of 4 kinds of targets

下面验证 SAVM 相较于其他光谱相似性测度的优势, 对比测度选为 SPM 和 SCWM, 以上述 4 型导弹尾焰的特征光谱为例, 计算各自测度值, 结果如表 2 所示。可以看出, 相同两光谱间的匹配中, SAVM 相对于 SPM 和 SCWM 数值更大, 光谱判别能力更强。以光谱线型最为接近的 A、C 间的匹配为例, 其中 SBD、SSD 和 SID 仅考虑单一测度, 三者数值差异较大, 不考虑其作为识别判断的直接依据, 而融合了多测度的 SPM、SCWM 和 SAVM 数值差异较小, 对目标匹配的判断较为稳定, 因此可作为匹配识别判据。其中, SAVM 相较于其他两种综合测度数值较大, 针对目标特性能够更准确地地区分目标, 实现弹道目标的准确识别, 识别精度更高。

在实际的目标匹配识别过程中, 当预警卫星获取目标的红外辐射光谱信息后, 需要与导弹光谱库中大量的光谱进行比对, 如美国建立了世界上 7000 多种导弹的光谱数据库。本文提出的方法与传统的目标识别技术相比极大减少了检测识别时间, 提升了识别精确度, 能更好地满足拦截需求。随着窄带光谱和超窄带光谱技术的发展, 它们将被更广泛地应用于检测和识别领域, 为快速准确地识别弹道目标提供便利。

表 2 全波段和特征波段下的光谱相似性测度值

Table 2 Spectral similarity values by different ways in the full-wave band and the characteristic band

Parameters		A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D	
Full-wave band	Coefficient	x	0.2460	0.4125	0.9546	0.4986	0.3803	0.4618
		y	0.5356	0.2697	0.0187	0.2885	0.2804	0.3952
		z	0.2183	0.3178	0.0267	0.2129	0.3393	0.1430
	Method	SBD	0.1464	0.1383	0.1833	0.2054	0.2381	0.1351
		SSD	0.0026	0.0014	0.0032	0.0002	0.0143	0.0101
		SID	0.1976	0.3209	0.5196	0.3684	0.4106	0.1774
		SPM	0.0291	0.0447	0.0964	0.0767	0.0998	0.0242
		SCWM	0.0179	0.0842	0.1799	0.1302	0.1431	0.0775
		SAVM	0.0805	0.1594	0.1889	0.1089	0.2339	0.0917
		Characteristic band	Coefficient	x	0.3857	0.2248	0.8801	0.6760
y	0.3632			0.4249	0.0280	0.1592	0.0581	0.3487
z	0.2511			0.3503	0.0919	0.1648	0.1998	0.3456
Method	SBD		0.1651	0.2406	0.3955	0.2812	0.4269	0.2630
	SSD		0.0012	0.0324	0.0031	0.0381	0.0046	0.0103
	SID		0.1313	0.4998	0.8343	0.2927	0.5916	0.1528
	SPM		0.0291	0.1238	0.3483	0.0854	0.2692	0.0412
	SCWM		0.0851	0.1045	0.3834	0.2349	0.3963	0.1284
	SAVM		0.0967	0.2429	0.4248	0.2444	0.4353	0.1368

4 结束语

在综合考虑尾焰特征光谱提取原则的基础上建立了导弹尾焰特征光谱提取模型,利用改进的向前和向后间隔偏最小二乘法提取了特征波段,同时提出匹配精度更高的 SAVM,仿真实验中验证了其具备更强的光谱判别能力,采用主动段弹道目标识别方法能够以小光谱数据实现弹道目标的快速匹配识别。

研究的特征波段主要集中在中红外波段,下一步工作中将继续探究导弹尾焰在紫外波段以及钠、钾等特征元素的光谱辐射特性,着眼于预警卫星对弹道目标探测与识别的实际需要,分析探测器在上述波段的探测与识别可行性,建立更加完备的特征光谱提取模型与光谱判别方法。

参 考 文 献

- [1] Wang Chao. Research on space-based surveillance imaging system of infrared space targets [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
王 超. 空间红外目标天基监视成像系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [2] Cao Lelin, Wu Chunfeng, Hou Qingyu, *et al.* Survey of target recognition technology based on spectrum imaging [J]. Optical Technique, 2010, 36(1): 145-150.
操乐林, 武春风, 侯晴宇, 等. 基于光谱成像的目标识别技术综述[J]. 光学技术, 2010, 36(1): 145-150.
- [3] Gao Shan, Wang Sen, Liu Jianhua. Matching target character model and simulation realization of space-ground warning system based on template [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition). 2011, 12(5): 35-39.
高 山, 王 森, 刘建华. 基于模板的天基预警系统目标性质匹配模型与仿真实现[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(5): 35-39.
- [4] Wu Xia, Zhou Yan, Cui Jian, *et al.* Analyses on infrared optoelectronics recognition technology in missile defense system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(5): 759-766.
吴 瑕, 周 焰, 崔 建, 等. 导弹防御系统中红外光电识别技术分析[J]. 红外与激光工程. 2009, 38(5): 759-766.
- [5] Dong Hongle, Cao Min, Hu Jiemin. Target motion modeling and type classification in ballistic missile early warning system [J]. Aero Space Electronic Warfare, 2007, 23(2): 9-12.
董洪乐, 曹 敏, 胡杰民. 弹道导弹预警系统目标运动建模和类型识别[J]. 航天电子对抗. 2007, 23(2): 9-12.
- [6] 吴建峰, 黄树彩, 康红霞, 等. 高光谱成像技术在天基导弹预警探测中的应用[J]. 飞航导弹, 2015(2): 68-73.
- [7] Wang Feng, Hu Xiaoyang, Ye Yidong, *et al.* Development of ultra-narrow band filter technique [J]. Laser &

- Optoelectronics Progress, 2007, 44(6): 62-67.
王 锋, 胡晓阳, 叶一东, 等. 超窄带滤光技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(6): 62-67.
- [8] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, *et al.* A band selection method for infrared warning satellites based on radiation flux apparent contrast spectrum[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014, 33(5): 492-497.
刘尊洋, 邵 立, 汪亚夫, 等. 基于辐射通量表观对比度光谱的红外预警卫星探测波段选择方法[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(5): 492-497.
- [9] Shu Rui, Zhou Yanping, Lu Chunlian. Best detection wavelength bands selection method based on multispectral radiation difference[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(8): 2505-2512.
舒 锐, 周彦平, 卢春莲. 基于多光谱辐射特性差异的最佳探测波段的确定方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2505-2512.
- [10] Kang Hongxia, Huang Shucai, Ling Qiang, *et al.* A detection method based on spectrum characteristics of missile plume using SVDD algorithm[J]. Infrared Technology, 2015, 37(8): 696-700.
康红霞, 黄树彩, 凌 强, 等. 基于导弹尾焰特征谱的 SVDD 检测方法[J]. 红外技术, 2015, 37(8): 696-700.
- [11] Zhang Shukun, Cai Jing, Yang Yongjun. Simulation of infrared radiation characteristics of the exhaust plume by using backward Monte Carlo method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2604-2609.
张术坤, 蔡 静, 杨永军. 尾焰红外辐射特性的反向蒙特卡罗法模拟[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2604-2609.
- [12] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, *et al.* Influence of flight parameters on the infrared radiation of a liquid rocket exhaust plume[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0404001.
刘尊洋, 邵 立, 汪亚夫, 等. 飞行参数对液体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0404001.
- [13] Qu Fangfang, Ren Dong, Hou Jinjian, *et al.* The characteristic spectral selection method based on forward and backward interval partial least squares[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(2): 593-598.
瞿芳芳, 任 东, 侯金健, 等. 基于向前和向后间隔偏最小二乘的特征光谱选择方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(2): 593-598.
- [14] Tang Xiaojun, He Huimin, Li Yujun, *et al.* Analysis of mixed alkane gas based on Tikhonov regularization spectra selection and optimal neural network parameters selection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1673-1677.
汤晓君, 郝惠敏, 李玉军, 等. 基于 Tikhonov 正则化特征光谱选择与最优网络参数选择的轻烷烃气体分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1673-1677.
- [15] Du Peijun, Tang Hong, Fang Tao. Algorithm for spectral similarity measure in hyperspectral RS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(2): 112-115.
杜培军, 唐 宏, 方 涛. 高光谱遥感光谱相似性度量算法与若干新方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(2): 112-115.
- [16] Fang Shenghui, Gong Hao. Spectral similarity scale based on dynamic weighting adjustment method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(12): 1044-1046.
方圣辉, 龚 浩. 动态调整权重的光谱匹配测度法分类的研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(12): 1044-1046.
- [17] Kong Xiangbing, Shu Ning, Tao Jianbin, *et al.* A new spectral similarity measure based on multiple features integration[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(8): 216-2170.
孔祥兵, 舒 宁, 陶建斌, 等. 一种基于多特征融合的新型光谱相似性测度[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 216-2170.
- [18] Zhong Yu, Wu Xiaoyan, Huang Shucai. Detection ability of infrared early warning satellite for ballistic missile in boost phase[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(11): 3276-3281.
钟 宇, 吴晓燕, 黄树彩. 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.
- [19] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, *et al.* Influence on after burning on infrared radiation of solid rocket exhaust plume [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0604001.
刘尊洋, 邵 立, 汪亚夫, 等. 复燃对固体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0604001.
- [20] Ye Q, Sun X Q, Zhang Y J, *et al.* Modeling and simulation of infrared radiation from rocket plume at boosting stage [C]. SPIE, 2009, 7383: 738318.
- [21] Zhang Junzhe, Zhu Wenquan, Dong Yan sheng, *et al.* A spectral similarity measure based on changing-weight combination method[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(3): 418-424.
张浚哲, 朱文泉, 董燕生, 等. 一种基于变权重组合的光谱相似性测度[J]. 测绘学报, 2013, 42(3): 418-424.