

〈制导与对抗〉

基于导弹尾焰特征谱的 SVDD 检测方法

康红霞, 黄树彩, 凌 强, 吴建峰, 钟 宇

(空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安, 710051)

摘要: 现有天基红外导弹预警系统对目标的探测侧重于对红外图像的处理。从光谱维数据分析角度出发结合支持向量数据描述基本理论, 提出了一种基于导弹尾焰特征谱的 SVDD 检测方法。应用小样本训练数据建立了单分类器, 以 11 型导弹目标的红外辐射尾焰特征谱数据作为训练样本, 比较了 RBF 与 SSM 作为核函数的检测效果, 应用交叉检验的方法确定宽度因子和相似临界因子的值, 结果表明, 在低信噪比红外图像中, 基于 SSM-Kernel 的 SVDD 检测性能优于基于 RBF-Kernel 的检测性能。应用训练样本数据的辐射双峰所对应中心波长作为匹配模板进行识别, 实验表明方法具有可行性。

关键词: 支持向量数据描述; 红外弱小目标; 目标检测; 导弹尾焰; 核函数

中图分类号: TN976 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2015)08-0696-05

A Detection Method Based on Spectrum Characteristics of Missile Plume Using SVDD Algorithm

KANG Hong-xia, HUANG Shu-cai, LING Qiang, WU Jian-feng, ZHONG Yu

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

Abstract: The detection of the space-based infrared warning system usually dwells on the infrared images processing. In the paper, a new detection method based on spectral characteristics of ballistic missile plume using SVDD algorithm was discussed, with spectral analytical technology combined with SVDD theory. A one-class classifier was designed under small training set conditions, with the plume infrared spectral characteristics of eleven missile types used as training samples. The effect of detection was compared between RBF kernel function and SSM kernel function and the value of parameter width factor and similar critical factor were decided by cross validation experiment. Experimental results show that SSM-Kernel can obtain satisfactory detection performance than RBF-Kernel in the infrared image with lower Signal Noise Ratio. A matching template model was employed applying central wavelength of double radiation peak based on the supported vector sample. Experiments show the method is feasible.

Key words: SVDD, infrared dim and small targets, target detection, missile plume, kernel function

0 引言

弹道导弹的防御历来是空天防御的重点和难点。目前, 弹道导弹防御遇到的问题是发现难、拦截难。基于天基红外预警系统对弹道导弹进行探测, 是解决这一问题的途径之一。由于大气辐射对红外探测器的影响, 导弹预警红外图像中包含有严重的起伏背景, 且由于探测距离远, 目标在探测器上的成像

小, 相对于背景和传感器噪声而言, 目标强度较弱, 没有形状、大小、纹理等特征, 再加上对目标的轨迹、方向及位置等目标轨迹信息均未知^[1-2], 如何在尽可能远的距离上对目标进行快速检测和准确识别, 是提升天基红外预警系统预警能力的关键。

现有的基于天基红外预警卫星支持的弹道导弹目标检测, 通常利用目标的运动特性以及与背景的对比度进行检测^[1-4]。存在的问题是: 由于探测元数

量多以及要经过多帧观测耗费时间长,影响了反导的“时效性”。现有的目标识别主要依靠卫星对主动段观测的角测量信息和红外辐射强度信息估计主动段战术参数,将典型参数与数据库进行对照,确定导弹类型^[5-6]。存在的问题是:需要的信息量多,对数据库的要求高,经过对整个助推段的多次探测,影响了反导作战的“时效性”和“准确性”。利用弹道导弹尾焰红外辐射高光谱指纹信息,提出基于SVDD目标检测与光谱库匹配识别方法。具体思路是:对已收集的少量型号目标尾焰特征谱进行训练,从中提取目标的代表特征,选择一个单分类器来判别目标发生与否,即利用分类器实现目标的快速检测;若发生,利用尾焰红外特征谱特性进行型号匹配,实现目标的型号识别。如果目标不在型号库中,识别出的型号是与库中最接近的型号。

1 SVDD检测模型

1.1 基本思想

支持向量数据描述(Support Vector Data Description, SVDD)是在统计学习理论和支持向量机基础上发展形成的一种单分类器,已经被广泛应用于奇异值检测和目标分类中^[7],尤其在解决小样本分类问题方面具有优良性能。天基红外预警系统是弹道导弹防御系统的重要组成部分,它通过红外传感器探测弹道导弹发射时的导弹尾焰的红外辐射,实时对目标的发射预警^[1]。弹道导弹发射阶段尾焰受大气吸收及发动机燃烧状态影响,不同高度目标尾焰特征谱曲线有一定差别,建立不同高度目标尾焰训练样本复杂性很大,工程化实现很难。提出一种基于目标尾焰红外辐射特征谱的SVDD目标检测方法,选择少量型号特征谱作为训练样本,从中提取弹道导弹尾焰红外辐射谱的代表特征,通过计算包含特征谱数据的最小超球体边界对数据的分布范围进行描述,形成一个单分类器,用于判断是否为目标。

1.2 算法描述及核函数的选择

SVDD运用核函数将低维稠密数据映射到高维特征空间进行分类。核函数的性能与SVDD的性能有密切关系,目前常用的核函数有线性核函数、多项式核函数、高斯径向基核函数等。基于弹道导弹目标尾焰的红外辐射光谱与周围环境的差别主要体现在两个方面,一是辐射强度,另一个是光谱曲线形状。因此,实验1对高斯径向基核(Gaussian Radial Basis Function Kernel, RBF-Kernel)函数和光谱相似度核(Spectral Similarity Measurement Kernel,

SSM-Kernel)函数进行对比选择。

支持向量数据描述算法是:给定一个有共同特性的样本集 $T = \{x_i; i = 1, \dots, M\}$, 对该数据集进行描述,先定义一个包含该数据集的由中心 a 和半径 $R > 0$ 确定超球体,通过最小化 R^2 来找到体积最小的超球体,以对该数据集进行描述,并使全部(或尽可能多)的样本点都包含在该球体内。能够将该类样本包围的超球体为:

$$S = \{x: \|x - a\|^2 < R^2\} \quad (1)$$

并寻找满足该要求的最小封闭超球面,即:

$$\min(R) \text{ 使得 } x_i \in S, i = 1, \dots, M \quad (2)$$

在SVDD函数的两类分类过程中,设测试向量为 y , 样本类别判决函数为:

$$SVDD(y) = \langle y, y \rangle - 2 \sum_i \alpha_i \langle y, x_i \rangle + \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j \langle x_i, x_j \rangle \quad (3)$$

式中: x_i 为训练样本; α_i 为SVDD优化的拉格朗日系数。由于特征谱数据分布的非线性特性,在原始数据空间内,超球体不能提供数据集的紧致描述,需要将线性SVDD方法通过非线性函数 Φ 映射高维特征空间,在特征空间寻找特征向量支撑的最小封闭超球面,对应为输入空间的非线性超球体,构成非线性SVDD。测试向量 y 在特征空间映射为 $\Phi(y)$, 此时,判决式可以表示为:

$$SVDD[\Phi(y)] = \langle \Phi(y), \Phi(y) \rangle - 2 \sum_i \alpha_i \langle \Phi(y), \Phi(x_i) \rangle + \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j \langle \Phi(x_i), \Phi(x_j) \rangle \quad (4)$$

将特征空间的内积转换为输入空间的核函数进行计算:

$$SVDD[\Phi(y)] = K(y, y) - 2 \sum_i \alpha_i K(y, x_i) + \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j K(x_i, x_j) \quad (5)$$

寻找一个合适的核函数将线性SVDD扩展为非线性SVDD。

高斯径向基核(RBF)记为 K_r , 核函数表达式为:

$$K_r(x, y) = \exp(-\|x - y\|^2 / c) \quad (6)$$

式中: c 为RBF的宽度因子; $\|\cdot\|$ 是欧式2范数。

光谱相似度核(SSM)记为 k_s , 核函数表达式

为:

$$k_s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} \exp\left(\frac{-\cot[\pi(\rho+1)/4]}{\theta}\right), & (\rho \in [-1, 1]) \\ 0, & (\rho = -1) \end{cases} \quad (7)$$

ρ 为光谱向量 \mathbf{x} , \mathbf{y} 的互相关系数, 表达式为:

$$\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})}{[(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})^T (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})]^{1/2}} \quad (8)$$

式中: $\bar{\mathbf{x}}$, $\bar{\mathbf{y}}$ 分别为 \mathbf{x} , \mathbf{y} 的均值; $\rho \in [-1, 1]$; θ 为 SSM 的相似临界因子。

2 基于支持 SVDD 向量样本集目标识别方法

2.1 基本思想

鉴于天基预警卫星获取的红外影像块数据量大, 逐像元提取特征谱信息输入 SVDD 分类器耗费时间。首先将获取的红外影像进行背景抑制, 得到含有目标点的二值图^[1-2], 提取这些点的红外辐射特征谱信息作为测试数据, 通过 SVDD 分类器判别是否目标, 若为弹道导弹目标类, 则进行下一步型号确认。将支持 SVDD 向量的训练样本形成模板库, 利用一定的规则识别目标。文献[8]中 SooRyeon RYU 测试并证明在红外光谱中, 峰极大值表面的位移, 一般产生于两条重叠谱带相对贡献的变化, 这些物质拥有固定的吸收频率, 但含量及相对强度有所不同, 且吸收带真实位置的波动是非线性现象, 在这一观点下, 我们认为采用的火箭发动机推进剂不同, 在一定温度和浓度下, 发动机尾焰燃烧后气体组分的相对稳定性, 导弹尾焰有唯一的红外辐射峰指纹特性。导弹尾焰燃烧后的混合气体在波谱特征曲线上表现为双峰分布曲线, 两种气体的混合成分比例变化影响着尾焰的波谱辐射曲线线型。同时, 文献[9]、[10]中也分析了导弹目标尾焰红外辐射频谱特性, 受大气吸收的影响, 不同海拔高度的目标尾焰辐射强度不同, 但整体频谱曲线相似, 且辐射峰对应的中心波长位置基本不变, 基于此, 提出利用红外辐射双峰对应的波长进行识别导弹型号。

2.2 红外辐射光谱特征值选取

采用导数光谱 (Spectral Derivative) 技术提取目标红外辐射参数。采用如下公式分别计算光谱辐射率的一阶和二阶导数:

$$I'(\lambda_i) = \frac{dI(\lambda_i)}{d\lambda} = \frac{I(\lambda_{i+1}) - I(\lambda_i)}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} \quad (9)$$

$$I''(\lambda_i) = \frac{d^2I(\lambda_i)}{d^2\lambda} = \frac{I'(\lambda_{i+1}) - I'(\lambda_i)}{\Delta\lambda} = \frac{I(\lambda_{i+2}) - 2I(\lambda_{i+1}) + I(\lambda_i)}{(\Delta\lambda)^2} \quad (10)$$

式中: λ_i 是波段 i 的波长值; $I'(\lambda_i)$ 、 $I''(\lambda_i)$ 分别是波长 λ_i 处的一阶、二阶导数; $I(\lambda_i)$ 是波长 λ_i 处经过归一化后的辐射强度值; $\Delta\lambda$ 是波长 λ_i 到 λ_{i+1} 的波段间隔。

通过一阶导数光谱得出辐射光谱中极值点波长的位置。在一阶导数基础上进行二阶微分处理, 二阶导数小于零的一阶导数光谱过零点为原辐射光谱极大值点, 取峰值最大的前两个极值点作为下一步匹配的基础。

2.3 匹配策略

设天基红外预警传感器的扫描帧频为 1 帧/秒, 对于有 C 个检验目标 $\omega_i (i=1, 2, \dots, C)$, 在第 $j (j=1, 2, \dots, n)$ 帧, $n \geq 1$, 检验目标在 2.7 μm 、4.3 μm 谱带附近辐射峰值所对应的中心波长, 特征模型记为

$$z_C^j = \{\lambda_L^j, \lambda_R^j\}。$$

设天基红外预警传感器在相邻 j 帧内观测条件相同, 即为同精度观测值, 选取标准差的估计值中误差 m 作为匹配精度指标。第 i 个目标与参考库目标特征模型的中误差定义为如下:

$$m_i = \pm \sqrt{\frac{A_{j1}^2 + A_{j2}^2 + \dots + A_{jt}^2}{n}} \quad (11)$$

A_{jt} 为第 i 个检验目标在第 j 帧与参考库中第 t 个目标的误差值, 其中 ($t=1, 2, \dots, N, N \geq 1$)。

$$A_{jt} = z_C^j - Z^t = \omega_1 |\lambda_L^j - \lambda_L^t| + \omega_2 |\lambda_R^j - \lambda_R^t| \quad (12)$$

设 λ_L^t , λ_R^t 为模板数据库目标在辐射双峰所对应的波段位置。式中: $0 < \omega_1 \leq 1$, $0 < \omega_2 \leq 1$ 此处采用 $\omega_1 = \omega_2 = 1$ 。

3 实验与结果分析

3.1 实验数据

弹道导弹尾焰红外辐射光谱数据在公开文献中比较少, 选用公开文献[10-11]中 4 型导弹作为训练样本, 文献[12-14]中 7 型弹道导弹尾焰红外辐射作为检验样本, 数据包括: 典型弹道导弹固体火箭推进剂的理论光谱辐射数据、美国国家航空航天局 (NASA) 公布的固体火箭尾焰光谱辐射数据、NASA

使用标准尾焰流场 (SPF) 模型计算 TitanIIIB 辐射数据等。作为干扰样本, 选择文献[2]中喷气飞机红外相对辐射强度光谱曲线 3 条, 分别为测量方位为 90°时, 发动机稳定状态、发动机加力状态和发动机额定状态下的尾向红外辐射强度光谱曲线。选取 ENVI 软件中 Spectral Library 中辐射光谱 0.4~14 μm 的 13 条波谱数据作为目标背景辐射数据。

3.2 RBF-Kernel 与 SSM-Kernel 的 SVDD 检测性能比较分析

3.2.1 实验 1 交叉检验确定核参数

定义代价函数 P_{Loss} :

$$P_{Loss} = \frac{P_1 + P_f}{2} \quad (13)$$

式中: P_1 为漏检概率, 表示将目标判别为非目标; P_f 为虚警概率, 表示将非目标判别为目标。通过设定不同的核参数, 分别对样本数据进行支持向量优化, 然后检验数据集对优化结果得到的支持向量描述进行交叉检验。通过交叉检验确定 RBF 中宽度因子 c 及 SSM 中的相似临界因子 θ 取值。如图 1 和图 2 所示。

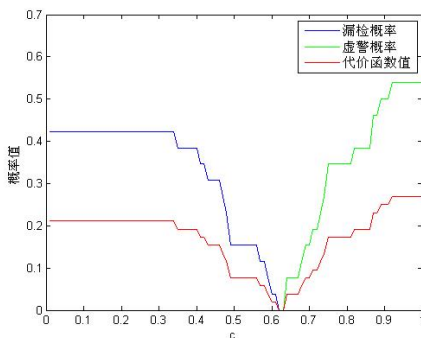


图 1 核参数 c 交叉检验结果曲线

Fig.1 The cross validation result of c parameter

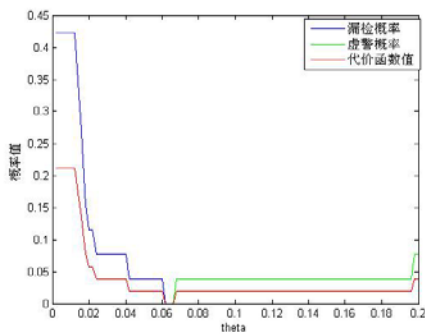


图 2 核参数 θ 交叉检验结果曲线

Fig.2 The cross validation result of θ parameter

可见, 在本例实验中, RBF 的宽度因子 c 取 0.6, SSM 中的相似临界因子 θ 取 0.06 都可以达到较好的

检测效果。

3.2.2 实验 2 不同信噪比条件下检测性能分析

天基导弹预警系统获取的红外图像中, 目标呈“弱”、“小”特性, 通常弱目标信噪比 (Signal Noise Ration, SNR) 定义为:

$$SNR = \frac{|s - u|}{\sigma} \quad (14)$$

式中: s 为目标平均灰度; u 为背景平均灰度; σ 为背景灰度的标准方差。 $s - u$ 体现了目标与背景的灰度对比度, σ 反应了图像空间噪声。一般情况下, 天基红外导弹预警系统的红外图像信噪比能达到 2~3^[1]。仿真实验时, 目标尾焰红外辐射光谱强度不变, 按红外图像 SNR 要求, 将背景干扰目标辐射强度变化, 形成 SNR 从 1.4~3.2 变化的目标背景辐射数据。应用实验 1 选取的最优核参数, 研究在不同信噪比条件下, 两种核函数对应检测概率。如图 3 所示。

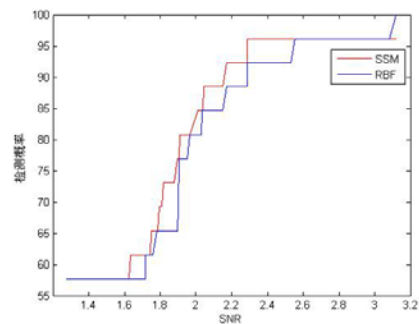


图 3 不同信噪比下 SSM 和 RBF 检测概率

Fig.3 SSM and RBF detection probability for different SNR

由图 3 得出, 信噪比约在 1.6~2.6 之间, 基于 SSM-Kernel 的 SVDD 检测概率都优于基于 RBF 的检测概率。当信噪比达到 3 以上 RBF-Kernel 的 SVDD 检测才明显高于基于 SSM-Kernel 的 SVDD 检测。这是由于 RBF-Kernel 是基于 L_2 距离度量的, 是特征谱 n 维波段亮度差异的总的贡献, 容易受太阳高度角、探测器方位、大气吸收等的影响。同时, 若信噪比达到 3 以上, 完全可以利用目标与背景的对比度进行检测, 不属于弱小目标检测范围。而 SSM-Kernel 不受这些外界条件的影响, 它利用目标与背景光谱角度方向差异明显进行测度。综合考虑实验 1 和实验 2 的结果, 基于 SSM-Kernel 的 SVDD 检测方法更适合于弹道导弹目标的预警检测。

3.3 实验 3 识别性能分析

利用光谱导数求出数据库光谱曲线双峰辐射峰所对应的中心波长, 取实验 1 中支持 SVDD 向量样本, 形成 11 型导弹目标特征谱模板库, 同时, 取此

11 型目标作为检验目标进行匹配, 即 C 为 11, 给目标特征谱加高斯随机噪声形成 10 帧随机观测值, 按照式子(11)计算中误差, 结果如表 1 所示, 中误差最小的为匹配成功目标。

表 1 中, 匹配中误差最小值分别为: 0.0062、0.0002、0.0029、0.0070、0.0009、0.0048、0.0010、0.0076、0.0098、0.0072、0.0052, 在本次试验中, 匹配识别率为 100%。

表 1 特征值匹配中误差结果

Table 1 Root mean square error result of feature matching

	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6	目标 7	目标 8	目标 9	目标 10	目标 11
检验目标 1	0.0062	0.6999	0.0478	0.1518	0.3559	0.6078	0.7540	0.7904	0.7687	0.6258	0.5561
检验目标 2	0.1300	0.0002	0.7023	0.6096	0.0889	0.4079	0.5588	0.3697	0.9874	0.7713	0.5459
检验目标 3	0.2635	0.8527	0.0029	0.0520	0.4532	0.6742	0.8453	0.3830	0.3683	0.3893	0.3460
检验目标 4	0.7576	0.63180	0.1313	0.0070	0.3566	0.8337	0.1239	0.2297	0.8207	0.5834	0.9745
检验目标 5	0.0610	0.9995	0.7065	0.9683	0.0009	0.8881	0.0464	0.5393	0.5085	0.0160	0.6930
检验目标 6	0.2304	0.3159	0.4311	0.4706	0.4442	0.0048	0.5339	0.0493	0.9322	0.3793	0.1473
检验目标 7	0.8738	0.9475	0.3908	0.8552	0.7305	0.6247	0.0010	0.0308	0.2359	0.7317	0.1417
检验目标 8	0.5202	0.5813	0.5192	0.8290	0.9270	0.5101	0.1828	0.0076	0.1715	0.2957	0.3696
检验目标 9	0.2072	0.7817	0.8960	0.7734	0.6945	0.1422	0.4551	0.4446	0.0098	0.8594	0.3222
检验目标 10	0.9173	0.4759	0.5163	0.7000	0.5099	0.2461	0.3688	0.5505	0.1282	0.0072	0.5845
检验目标 11	0.4327	0.3040	0.2462	0.8570	0.3763	0.4547	0.9530	0.2387	0.7557	0.7380	0.0052

4 结论

在“时敏性”要求很强的反导系统中, 传统目标检测与识别方法显示了很大的局限性, 制约了预警系统性能的进一步提高。基于弹道导弹尾焰红外辐射特征谱信息为反导提供了新的技术平台, 使得红外弱小目标的快速检测与准确识别成为可能。利用已有少量型号辐射光谱信息的 SVDD 检测方法有效, 此外, 利用支持 SVDD 样本集作为识别模板库方法可行。随着星载红外探测器的发展以及高光谱技术的广泛应用, 应用导弹尾焰红外光谱特性进行目标检测、识别和跟踪有良好的应用前景。

参考文献:

[1] 于强, 黄树彩, 赵炜, 等. 红外弱小目标检测与识别一体化方法研究[J]. 红外技术, 2014, 36(8): 633-638.
 [2] 胡永生. 复杂背景中红外弱小目标探测方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
 [3] Dimitris Manolakis. Signal processing algorithms for hyperspectral remote sensing of chemical plumes[C]//IEEE international conference on Acoustics, Speech and signal processing, 2008: 1857-1860.
 [4] Stanley R Rotman. Spatial and temporal point tracking in real

hyperspectral images[R]. XCEOARD, Israel: Ben-gurionuniversity of the negevbeersheba dept. of electrical and computer engineering, 2006.
 [5] 李盾. 空间预警系统对目标的定位与预报[D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2001.
 [6] 李盾, 周一宇, 吕彤光, 等. 空间预警系统对弹道导弹的监视与跟踪[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(3): 52-56.
 [7] 王立国, 赵春晖. 高光谱图像处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
 [8] SooRyeon RYU, Isao NODA, JUNG Young Mee. 红外吸收峰的位置波动: 归因于单一谱带的频移还是重叠谱带相对强度的变化?[J]. 中国实验室, 2011, 9(6): 14-16.
 [9] 郭德阳, 陈建文, 吴瑕. 弹道目标尾焰特性探究[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(1): 106-111.
 [10] Andreas Blanc, Lukas Deimling, Norbert Eisenreich. UV- and IR-Signatures of Rocket Plumes[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2002, 27(3): 85-189.
 [11] 张鑫, 郭宜忠, 万新敏, 等. 基于红外特性的弹道导弹助推段预警探测能力仿真[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(5): 92-95.
 [12] 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): 0604001-1-0604001-7.
 [13] 刘尊洋, 汪亚夫, 邵立, 等. 数值模拟液体火箭尾焰流场和红外辐射特性[J]. 火箭与制导学报, 2013, 33(4): 119-122.
 [14] 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): 2404-2409.