

模糊识别算法在导弹尾焰光谱识别中的应用

黄 达, 黄树彩, 唐意东, 刘锦昌

(空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051)

摘 要: 目前基于天基高光谱图像的导弹识别算法都是从光谱曲线的整体分析考虑, 所需数据量大, 算法处理冗余。为弥补算法不足, 首先从导弹尾焰光谱的影响因素考虑, 分析了导弹发动装置, 燃料成分及温度压强对尾焰光谱的影响, 得出在一定假设条件下, 使用特征段处的辐射数据即可达到导弹识别的结论。在此基础上引入模糊识别算法, 算法充分利用辐射强度与光谱线型信息, 识别结果是各型号导弹的隶属概率。通过对光谱角测度分析, 发现其过于依赖线型, 对线型相近的谱线识别效果不佳, 将模糊识别结果与光谱角测度识别结果对比, 证实了模糊算法在光谱识别中的优越性。

关键词: 导弹尾焰; 模糊识别; 高光谱

中图分类号: TN273 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0704002

Application of fuzzy recognition algorithm in the spectrum identification of missile tail flame

Huang Da, Huang Shucui, Tang Yidong, Liu Jinchang

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

Abstract: At present, the missile recognition algorithm based on the space-based hyperspectral image is considered from the overall analysis of the spectral curve. The required data is large and the algorithm is redundant. In order to solve the problem of insufficient algorithm, the influence of missile launching device, fuel composition and temperature pressure on the tail flame spectrum from the influence factors of missile tail flame spectrum was analyzed firstly, and the radiation data at the characteristic interval under certain assumptions was used to obtain the conclusion of missile identification. On this basis, the fuzzy recognition algorithm was introduced. The algorithm made full use of the radiation intensity and the spectral line information. The recognition result is the membership probability of each type missile. Through analyzing the spectral angle, it is found that it is too dependent on the line type, and the effect of the line recognition is poor by comparing the fuzzy recognition result with the spectral angle measurement, the superiority of the fuzzy algorithm in the spectral recognition is proved.

Key words: missile tail flame; fuzzy recognition; hyperspectral

收稿日期: 2018-02-11; 修订日期: 2018-03-15

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, 主要从事弱小目标探测识别方面的研究。Email: 809710379@qq.com

导师简介: 黄树彩(1967-), 男, 博士生导师, 博士, 主要从事空天防御系统与工程方面的研究。Email: hsc07118@126.com

0 引言

物质的光谱曲线具有指纹特性^[1],一类物质的光谱曲线有着相似特征,一种物质的光谱线有着相似度更高的特性,在各领域,根据光谱来识别物质属性已经是一种常见技术。

模糊算法因其独特的模糊性在控制领域和模式识别领域被广泛应用^[2-3]。模糊控制的控制过程相比传统控制更具快速性,但其准确性不能保证;在模式识别领域,因算法的快速、智能等特点,可使识别结果更具可信性。

天基红外探测器所探测到的导弹尾焰图像,仅占几个像素,以亮点形式表现^[4],为更准确快速地识别目标,可在天基红外探测器中搭载高光谱设备^[5],获取目标光谱图像并根据光谱的指纹特性对目标进行识别。

王晋年提出的光谱吸收指数(SAI)可描述光谱特征,为光谱识别分析奠定基础^[6];二值编码匹配算法是在特征波段处设定阈值,用 0、1 压缩光谱,最后形成一组二值编码,根据这组编码进行识别^[7],这种识别方法可以提高光谱分析效率,但光谱的很多细节会被忽略;光谱角匹配算法(SAM)是根据两个矢量之间的夹角来定义两矢量的相似度^[8],该算法更能体现光谱的线型相似度,较为经典,但所需数据量大,处理冗余。

根据尾焰光谱进行导弹识别对实时性和精确性要求非常高,上述所列算法是根据光谱的全波长辐射数据进行识别的,这无疑不适用于实时性检测系统,基于此,文中针对导弹尾焰特征波段辐射值,应用模糊算法完成导弹尾焰光谱检测,该算法综合了光谱线型与辐射强度特征,减少数据量的同时,得出了可信服的结果。

1 导弹尾焰光谱分析

光谱是由于物质内部的分子、原子或离子在外部能量的作用下使其内部能量状态发生变化,即能级变化,并以电磁辐射的形式释放或吸收能量^[9]。从光谱产生的本质出发,可将光谱分为原子光谱和分子光谱。

根据光谱的生成规律可认为物质光谱的中心波长及光谱线型由物质属性决定,光谱强度受外界能量影响^[10-12]。

导弹尾焰包含多种物质的混合物,比如水、二氧化碳、臭氧、含金属离子的分子等^[13]。其属性的影响因素包含这些混合物质的属性及比例,外界作用能量,压强,温度等因素影响。导弹型号的识别可理解为导弹尾焰属性的识别。

从影响导弹尾焰属性的角度出发,对发动机、燃料成分及比例、温度、压强等因素作出分析。

1.1 发动机对导弹尾焰光谱影响分析

不同型号弹道导弹因其战略目的不同,且每个国家发动装置技术水平不同,使得不同弹道导弹具有对应的发动装置^[14];不同的发动装置产生的尾焰光谱是不同的,Andreas Blanc 等人通过实验分析,给出复合型导弹发动机与双基型导弹发动机在紫外和红外处的光谱辐射强度的差异及随时间的变化趋势^[15],如图 1、图 2 所示。

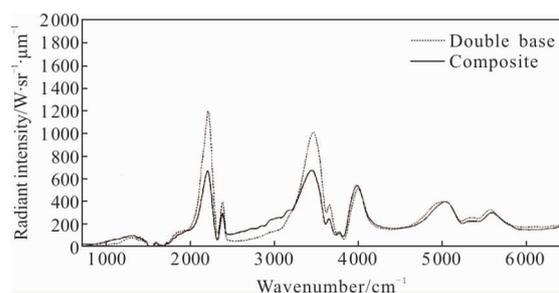


图 1 复合型和双基型发动装置在红外波段处的光谱曲线
Fig.1 Spectral curves of the composite and double base type

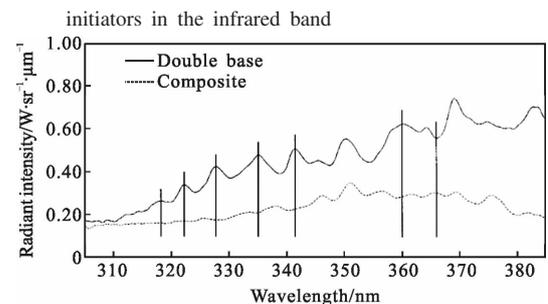


图 2 复合型和双基型发动装置在紫外波段处的光谱曲线
Fig.2 Spectral curves of composite and double base type initiators in ultraviolet band

从图 1 可以看出:两种发动机在红外波段所产生的尾焰光谱在特征段处有明显差异,其余波段处辐射差别较小;从图 2 可以看出:在整个紫外波段处辐射值有明显差异。

发动机装置影响因素包含燃烧室、尾喷管、发动结构及发动机材料等,对复合型和双基型发动装置

而言,因其在特征波段处辐射差别明显,根据特征段的辐射强度可达到对这两种发动机的识别目的。假设不同发动装置都具有上述特性,该假设符合光谱生成原理,在各发动装置在特征段处产生的辐射范围已知的条件下,可仅区分特征段辐射值而达到发动装置识别的目的。

1.2 燃料成分比例对尾焰光谱影响分析

发动机为达到其动力效果,对所使用燃料有严格的要求^[15]。尾焰中包含气体分子和金属离子,其比例及属性则受燃料影响。

参考文献[16]对固体燃料尾焰辐射建立 SIRRM 数学模型并通过计算机仿真,得出尾焰中有无金属离子时的光谱,如图 3 所示。

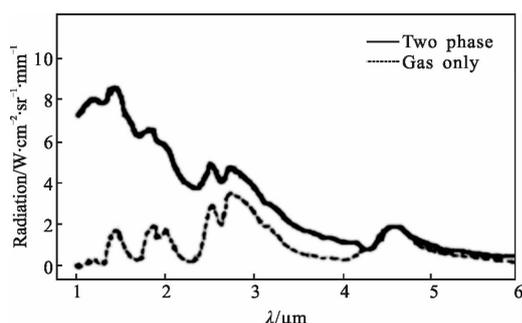


图 3 SIRR 模型计算的含粒子与无粒子导弹尾焰光谱

Fig.3 Tail flame spectrum of missile with particle and without particle calculated by SIRR model

从图 3 可以看出,光谱的整体辐射强度增高,但不同波长处辐射增加值不同。从尾焰属性角度考虑,尾焰中的物质比例发生变化,会导致其光谱线型及辐射强度发生改变。对尾焰中粒子的分析结果与上述结论相符。

进一步理解,尾焰属性会导致光谱发生变化,其变化体现在不同波长辐射增加或减少值不同。可以根据这一规律,对特征波段辐射进行分析以达到尾焰属性识别,进而到达导弹识别的目的。

1.3 温度、压强对导弹尾焰光谱影响分析

导弹尾焰在导弹点火至关机时间段内是一个动态变化过程,其外界影响因素主要有尾焰温度、大气压强等,内在影响因素主要有发动装置、燃料属性、运动状态等。这里仅考虑外界因素的影响,可将其抽象为尾焰距地面高度与温度、压强之间的非线性关系^[17]。现借助光谱数据库(HITEMP)^[18]对不同高度处的尾焰进行仿真,以二氧化碳和水分子作为主要辐

射分子,仿真谱线如图 4 所示。

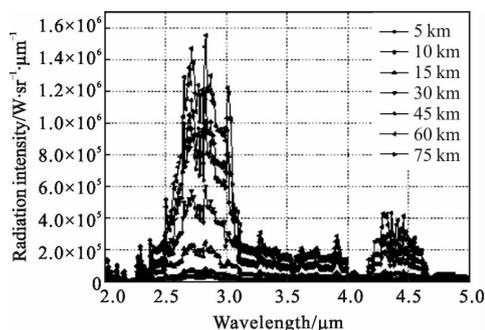


图 4 不同高度尾焰光谱仿真图

Fig.4 Simulation chart of tail height spectrum of different heights

从图 4 可以看出:光谱曲线随着高度的不同而有所变化,尤其在 2.7、4.3 μm 特征波段处,辐射变化相对其他波段较明显。

经上述系列分析可知,在导弹型号与尾焰光谱一一对应的条件下,可根据光谱特征波段处辐射强度区分导弹类型。

假设导弹尾焰在紫外和红外区域可找出 n 个特征段,在上述结论的基础上,使用模糊算法对这 n 个特征段的辐射值进行分析,可识别出导弹型号。

2 模糊识别算法应用

模糊识别算法的特点是使用模糊的判别标准,给出模糊的判断结果^[19]。模糊的判断标准是指隶属函数的确定具有模糊性,人为影响因素占有很大比重;模糊的判断结果是指识别结果是模糊的,以概率形式给出。

图 5 是所设计的系统流程图。

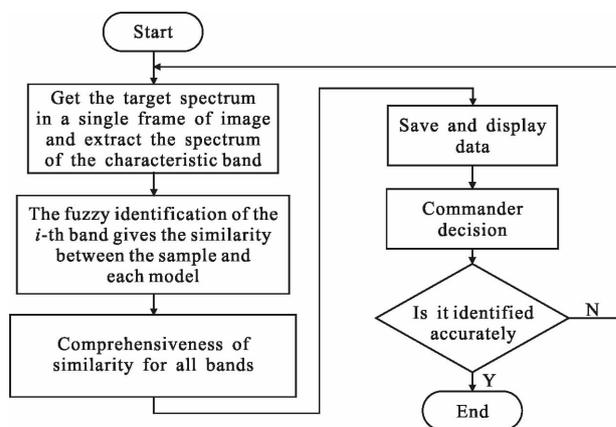


图 5 系统流程图

Fig.5 Flow chart of system

经过一定时间内的多次模糊识别,能够得到多组目标识别概率数据,指挥员可以根据这些数据对导弹类型进行最后判断。

2.1 样本的采集

设矩阵 X 表示采集样本值, n 表示样本组数, m 表示样本中的指标数, x_{ij} 表示第 j 组样本中第 i 个指标处的值^[20]。特征指标个数即特征波段个数,其决定着单个样本中数据个数。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} = (x_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

2.2 各特征段隶属度的确定

光谱角测度是根据光谱曲线的整体变化趋势进行相似度识别,即根据不同波段处的辐射强度变化进行判断^[20]。对于单个波段来说,其辐射因发动机、温度、压强等因素的影响,会在一定范围内动态变化,根据该变化可建立相应隶属函数。

各型号导弹尾焰光谱识别需要从整体谱线型和特征谱辐射强度两方面考虑,可建立双模糊识别算法,即先对样本中各特征段的值进行一次模糊识别,达到特征段辐射强度识别的目的;再对所有特征段的值进行二次模糊识别,达到整体谱线型识别的目的。

用矩阵 U 表示一次模糊隶属关系, l 表示划分的类别数,即将样本划分为 l 类, u_{kj} 表示第 j 个样本属于类 k 的隶属度。

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ u_{l1} & u_{l2} & \cdots & u_{ln} \end{pmatrix} = (u_{ij})_{l \times n} \quad (2)$$

根据隶属度定义可知:

$$\sum_{k=1}^l u_{kj} = 1 \quad 0 \leq u_{kj} \leq 1 \quad (3)$$

用矩阵 U' 表示二次模糊隶属度矩阵,跟 U 的特性相同, u_{ik} 表示在第 i 个指标处样本值属于类 k 的隶属度。

$$U' = \begin{pmatrix} u_{11}' & u_{12}' & \cdots & u_{1l}' \\ u_{21}' & u_{22}' & \cdots & u_{2l}' \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ u_{m1}' & u_{m2}' & \cdots & u_{ml}' \end{pmatrix} = (u_{ik}')_{m \times l} \quad (4)$$

$U' \subseteq U$, 根据所属类别概率等于样本数值与隶属度的乘积,即 $p = x \times u$, 则:

$$p_k = x_{ij} \times u_{ik}' \times u_{kj} \quad (5)$$

式中: p_k 表示样本属于 k 类的概率; x_{ij} 表示第 j 组样本值中在第 i 个指标处的值; u_{ik}' 表示第 i 个指标处属于 k 类的隶属度; u_{kj} 表示各个指标属于 k 类的隶属度。

假设选择三角形隶属函数确定各波段隶属值,波段 1 处的隶属曲线具有图 6 所示的形式。

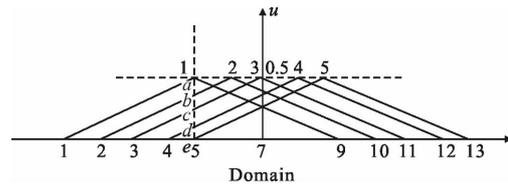


图 6 波段 1 处隶属度

Fig.6 Membership of band 1

图 6 中横轴表示辐射论域,纵轴表示隶属度,图中 a, b, c, d, e 点所对应的纵轴为辐射值为 5 时所对应的各型号导弹隶属度。

U 和 U' 要根据先验知识确定,在导弹尾焰数据缺乏的条件下,双模糊识别算法相对于目前的数据库光谱匹配算法来说具有一定复杂性,这里只使用一次模糊识别,即只在独立特征波段处使用模糊算法,在不影响识别准确性的前提下,用线性代数式代替二次模糊识别,使得算法更具实际效用。具体操作如下:

(1) 在各波段处根据辐射值进行一次模糊识别,关键在隶属矩阵 U' 的确定,在模糊算法中,隶属度的确定没有公式可循,只能凭借经验和试验,在缺少导弹尾焰辐射特性的真实数据的条件下,国内外很多研究者通过建立导弹尾焰辐射数学模型,考虑大气影响等因素,通过软件仿真得到一系列导弹尾焰光谱谱线^[21],借助这些仿真数据,建立三角形隶属度 U' ,其模型图如图 7 所示。

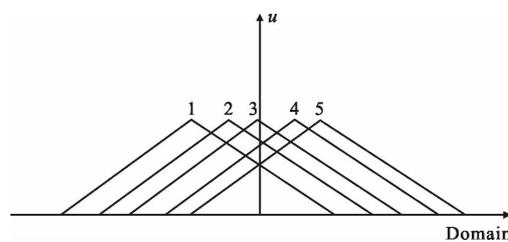


图 7 隶属度曲线

Fig.7 Membership curve

图 7 中数字表示导弹型号,一种型号导弹对应一个三角形,一个三角形所占的横坐标长度为该导弹辐射值范围,即论域。

因为导弹类型多样,可能存在数据库中无目标数据的情况,所以这里将公式(3)变化为公式(6),以便今后更新导弹数据:

$$0 \leq \sum_{k=1}^5 u_k \leq 1 \quad (6)$$

(2) 线性代数替代二次模糊识别,线性代数式应达到综合各波段隶属度的目的,具有一定的线型识别能力:

$$p_{kz} = \frac{W \cdot P^T}{m} = \frac{\sum_{k=1}^m w_k p_k}{m} \quad (7)$$

式中: W, P^T 是 m 维向量, W 中的元素表示各波段的权值, P^T 中的元素表示各波段的隶属度; p_{kz} 表示样本属于 k 类的综合隶属概率; $\sum_{k=1}^m w_k p_k$ 表示各波段处属于 k 类的概率和。

3 效果验证分析

参考文献[22]根据导弹尾焰物质成分等因素对导弹尾焰进行仿真计算,文中在其中包含金属离子的光谱图的基础上,拟出一组具有导弹尾焰特征的数据,并对其进行识别,导弹尾焰光谱具有以下规律,所拟合的数据应遵循这些规律。

(1) 尾焰中物质成分相同、温度压强不同时,光谱线型相同,各波长对应的辐射强度不同;

(2) 尾焰中各物质比例不同、温度压强相同时,光谱线型不相同,在所选波段范围内,导弹尾焰积分辐射强度相近;

(3) 尾焰中物质成分不同、温度压强不同时,光谱线型不相同,在所选波段范围内,导弹尾焰积分辐射强度有较大差异。

3.1 光谱角测度分析

图 8 中包含 5 条光谱曲线,其中曲线 2 是参考文献[22]中的仿真谱线,曲线 3 是在曲线 2 基础上加 2,曲线 4、曲线 5 在曲线 2 数据上分别取 1.3、0.3 的加权,曲线 2~曲线 5 之间都是线性关系,具有相同的线型。曲线 1 是在曲线 2 的基础上加 1 并在 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 附近任意变动,为使线型差异明显,在

$2.7 \mu\text{m}$ 附近有明显的吸收特征, $4.3 \mu\text{m}$ 附近有明显的波峰。曲线 2~曲线 5 因线型相同、辐射强度不同,故可将其看成是尾焰中物质成分相同、温度压强不同,即不同高度时的光谱线。曲线 1 因其具有另类线型,可将其看成是另类导弹尾焰光谱。

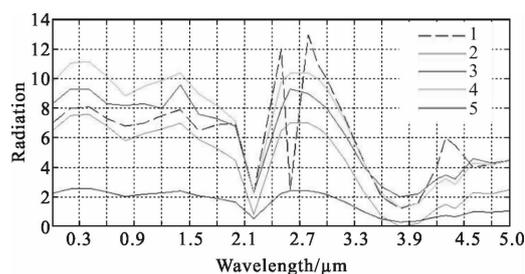


图 8 线型相同的尾焰光谱曲线

Fig.8 Tail flame spectrum curves with same line type

图 8 中的曲线 2~曲线 5 分别与曲线 1 做对比,采用光谱角测度计算得相似度,如表 1 所示。

表 1 同线型相似度

Tab.1 Similarity of same line type

Similarity between 1 and 2	Similarity between 1 and 3	Similarity between 1 and 4	Similarity between 1 and 5
0.954 5	0.954 5	0.954 5	0.954 5

表 1 中的相似度都高达 0.9545,从图 8 可看出:曲线 2~曲线 5 之间的辐射强度有着很大的不同,上述结果证实了光谱角测度对区别线型有效,但对辐射强度并不敏感。

现对图 8 中曲线 1~曲线 5 的各波长的辐射在一定范围内任意变动,使各波段波峰处辐射强度任意交叠,以使得曲线 1~曲线 5 线型不同,改变后的曲线命名为曲线 2~曲线 5,图 8 中的曲线 1 仍为曲线 1。改变后的谱线在图 9 中体现。

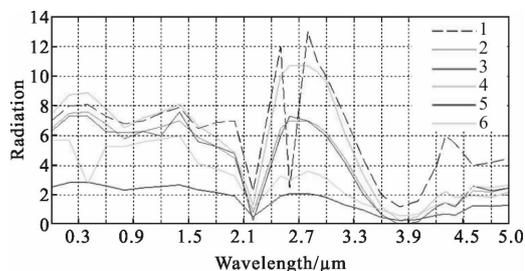


图 9 线型不同的尾焰光谱曲线

Fig.9 Tail flame spectrum curves with different line types

图 9 所列的谱线线型都存在差异,且其在全波长处的辐射和差异大,可认为是尾焰中各物质比例不同,温度、压强不同的导弹尾焰光谱,利用光谱角测度得到的相似度表如表 2 所示。

表 2 不同线型相似度

Tab.2 Similarity of different line types

Similarity between 1 and 2	Similarity between 1 and 3	Similarity between 1 and 4	Similarity between 1 and 5	Similarity between 1 and 6
0.942 5	0.937 4	0.947 9	0.934 4	0.908 4

从表 2 可看出:这几条曲线相似度相差不大,利用光谱角测度很难对其进行识别。图中曲线在 0~2、2.7、4.3 μm 附近重叠部分很少,可利用这些部分,使用模糊算法对其进行识别分类。

3.2 模糊识别算法效果验证分析

拟定的样本仅仅是在假设的导弹辐射范围内所取值,所以样本值属于何种型号导弹不能先验得知,此处,算法仅仅区分了辐射范围具有交叉重叠的样本,并给出区分概率。

波段 1 处算法如下:

(1) 对每个类型导弹尾焰在波段 1 处可能产生的最大、最小辐射做出经验判断。

(2) 在每个类型的最大、最小辐射区间设置函数作为该导弹辐射隶属度,此处应用三角函数。图 10、11 分别表示 1 型导弹尾焰隶属度和 5 种型号的导弹尾焰隶属度。

(3) 判断辐射强度所属论域区间。

(4) 根据所属区间隶属函数确定导弹类型概率。

其他波段论域的划分及波段的选择跟波段 1 处的

操作类似,隶属度函数应根据实际情况选择,论域划分的越细,隶属函数选择得越贴近实际,识别效果会越好。

确定样本在各波段处所属各类型导弹概率,使用公式(7)算出样本综合隶属概率。

考虑到尾焰辐射在 2.7、4.3 μm 处被大气层吸收,这两段论域在大气层内与大气层外的辐射存在突变,这两段的隶属函数的确定要与其他段相区别,各型导弹在各波段处最大、最小值如表 3 所示,其中波段 4、5 是水和二氧化碳的特征波段。

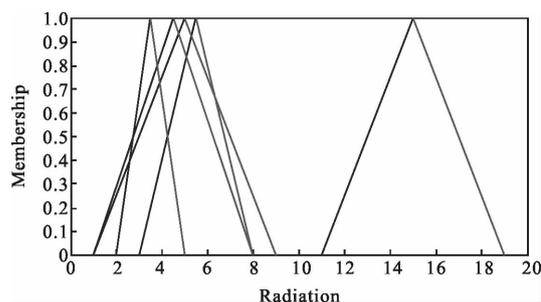


图 10 1 型导弹在各波段处的隶属度函数

Fig.10 Membership function of 1 type missile at each band

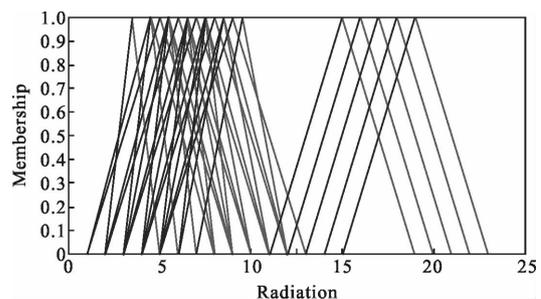


图 11 5 种类型导弹在各波段的隶属函数

Fig.11 Membership function of 5 types of missiles at each band

根据表 3 中各型号导弹在各波段处的辐射范围,拟定下样本值,其中样本 1 在波段 4、5 处的值是

表 3 各型号导弹隶属度及辐射范围

Tab.3 Membership and radiation range of various types of missiles

	Band 1		Band 2		Band 3		Band 4		Band 5	
	Radiation range	Membership function								
T1	1-9	Triangular	11-19	Triangular	1-8	Triangular	0-3, 3-8	0, Triangular	0-2, 2-5	1, Triangular
T2	2-10	Triangular	12-20	Triangular	2-9	Triangular	0-4, 4-9	0, Triangular	0-3, 3-6	1, Triangular
T3	3-11	Triangular	13-21	Triangular	3-10	Triangular	0-5, 5-10	0, Triangular	0-4, 4-7	1, Triangular
T4	4-12	Triangular	14-22	Triangular	4-11	Triangular	0-6, 6-11	0, Triangular	0-5, 5-8	1, Triangular
T5	5-13	Triangular	15-23	Triangular	5-12	Triangular	0-7, 7-12	0, Triangular	0-6, 6-9	1, Triangular

0,可认为是大气层内样本,其余样本可认为是大气层外样本,样本值如表 4 所示。

表 4 拟定样本值
Tab.4 Fitted sample values

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5
S1	4.3	13.6	7.5	0	0
S2	4.7	12.8	7.6	3.8	2.6
S3	5	16	7.9	7	3.9
S4	5	15	4.5	5.5	3.5
S5	6	16	5.5	6.5	4.5

样本输出结果如表 5 所示。

表 5 样本值输出结果
Tab.5 Output result of sample value

	T1 Probability	T2 Probability	T3 Probability	T4 Probability	T5 Probability
S1	0.33	0.28	0.24	0.22	0.14
S2	0.44	0.26	0.22	0.23	0.15
S3	0.58	0.89	0.53	0.41	0.22
S4	1	0.90	0.53	0.41	0.22
S5	0.63	1	0.63	0.33	0.13

通过上述样品实验,得到样本所属导弹型号的隶属概率,分析表 5 中的概率数据可知,样本 1 与样本 2 属于各型导弹的概率都非常低,具有相同的变化规律,可将其判断为属于同一型号的导弹样本;按照最大隶属度的选取原则进行决策的话,可判断样本 4 属于 1 型导弹,样本 3、样本 5 属于 2 型导弹。

对表 4 所列的样本数据,用光谱角测度得到的相似度如表 6 所示。

表 6 线型相似度
Tab.6 Line type similarity

S1 and S2	S1 and S3	S1 and S4	S1 and S5	S1 and S6
0.958 1	0.917 0	0.909 7	0.900 5	0.999 1

如果根据最大相似度原则,样本 1 与 2 属于一类导弹,样本 3 与 5 属于一类导弹,与模糊算法的识别结果相符,但对于样本 1 与 4 的识别,两种方法的

结果存在不同,其原因在于两样本曲线线型存在一定的差异,但其辐射值却都更接近 1 型导弹。

上述实验表明:模糊识别算法不仅可以体现出对辐射值的敏感性,在一定程度上也能体现出线型的相似程度。

4 结束语

模糊算法具有快速的特点,将其应用到光谱识别中来,使得光谱实时性检测成为可能。算法从光谱线型和辐射两个方面进行光谱数据处理,相比光谱角测度,模糊算法的识别结果更具可信性;模糊算法的原理是对导弹助推段尾焰辐射在各特征波段的变化关系进行输出,考虑了谱线的动态变化因素;模糊算法所需数据量相对少,且对探测器精度要求不高,这对导弹尾焰光谱在天基预警系统中的可用性做出了一定贡献。

模糊算法的最大缺陷是需要凭借经验去制定导弹尾焰光谱规律,也就是确定隶属度,这一点可作为今后的研究方向。

参考文献:

- [1] Ludwig C B, Malkmus W, Reardon J B, et al. Hand-book of infrared radiation from combustion [R]. NASA-SP-3080, 1973.
- [2] Cai Zixing. Introduction to Intelligent Control [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2007. (in Chinese)
蔡自兴. 智能控制导论 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [3] Chaudhari S R. Homomorphisms of fuzzy recognizers [J]. *Kybernetes*, 2007, 36(5): 768-775.
- [4] Bai X, Zhou F, Xie Y, et al. Adaptive morphological method for clutter elimination to enhance and detect infrared small target [C]//Internet Computing in Science and Engineering, International Conferencern on, IEEE, 2008: 47-52.
- [5] 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.
- [6] Wang Jinnian, Gu Xingfa, Ming Tao, et al. Classification and gradation rule for remote sensing satellite data products

- [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(3): 566–577. (in Chinese)
王晋年, 顾行发, 明涛, 等. 遥感卫星数据产品分类分级规则研究[J]. 遥感学报, 2013, 17(3): 566–577.
- [7] Zhong Xiaojiao. Hyperspectral data, unmixing and spectral matching [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
钟晓皎. 高光谱数据混合像元分解与光谱匹配验证算法[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [8] Lv Xuliang, Jia Qi, Rong Guanghui, et al. Application of degree of grey incidence on similarity of spectral curves[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 12(5): 496–500. (in Chinese)
吕绪良, 贾其, 荣光辉, 等. 灰色关联度在光谱曲线相似度分析中的应用 [J]. 解放军理工大学学报, 2011, 12(5): 496–500.
- [9] Ohta T, Bostwick A, Seyller T, et al. Controlling the electronic structure of bi-layer geographer [J]. *Science*, 2006, 313: 951–954.
- [10] Zhang L, Zhang L, Tao D, et al. Tensor discriminative locality alignment for hyperspectral image spectral-spatial feature extraction [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2013, 51: 242–256.
- [11] Opik U, Pryce M H L. Studies of the Jahn-Tellereffect (I.A survey of the static problem)[C]//Proc R Soc A, 1957, 238 (1215): 10.1098/rspa.1957.0010.
- [12] Feng Shengqi, Fang Hai, Qiu Qingchun. The Jahn-Teller effect and energy level splitting for B₂H₆ molecules with D_{3h} symmetry eon-figuration [J]. *J At Mol Phys*, 2011, 28 (2): 217. (in Chinese)
冯胜奇, 方海, 邱庆春. 具有 D_{3h} 对称性构型的 B₂H₆ 分子的杨-泰勒效应与能级分裂 [J]. 原子与分子物理学报, 2011, 28(2): 217.
- [13] Simmons F S. Rocket Exhaust Plume Phenomenology[M]. EI Segundo: The Aerospace Press and American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- [14] Devir A, Lessin A, Lev M, et al. Comparison of calculated and measured radiation from a rocket motor plume [C]//AIAA, 2001: 2001–0358.
- [15] Zhu Dingqiang, Zhang Xiaoying, Xiang Hongjun, et al. Measurement and calculation research of infrared radiation for solid rocket motor plume [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(1): 255–259. (in Chinese)
朱定强, 张小英, 向红军, 等. 固体火箭发动机喷流红外辐射实验及计算研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 255–259.
- [16] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, et al. Influence on after burning on infrared radiation of solid rocket exhaust plum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0604001. (in Chinese)
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.
- [17] 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(6): 473–480.
- [18] Rothman L S, Gordon I E, Barber R J, et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2010, 111(15): 2139–2150.
- [19] Bezdk J C, Hathaway R. Local convergence of the fuzzy c-means alorithms pattern recognition [J]. *Patten Recognition*, 1986, 19(6): 477–480.
- [20] Li Xican, Xie Mingdong, Xu Desheng, et al. On theoretic model of fuzzy classification and fuzzy recognition[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2002, 16(2): 58–63. (in Chinese)
李希灿, 解明东, 许德生, 等. 模糊聚类与模糊识别理论模型研究[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(2): 58–63.
- [21] 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
- [22] Vitkin E I, Karelin V G, Kirillov A A, et al. A physico-mathematical model of rocket exhaust plumes [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1997, 40(5): 1227–1241.