

特征光谱图像中导弹尾焰的模糊识别

黄达, 黄树彩, 赵炜, 陆屹

空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051

摘要 助推段导弹有高温、大面积的尾焰, 根据尾焰光谱特征可准确识别导弹。将其应用到天基预警系统能够使导弹防御系统趋于完善, 但光谱信息数据量庞大, 从获取光谱信息到识别光谱信息需要耗费大量时间。为此, 寻找能够代表导弹尾焰光谱的特征光谱, 使用模糊算法对特征光谱进行数据处理, 以达到准确、快速识别的目的。利用已有的红外图像和大气、云层、导弹及飞机尾焰光谱数据进行特征光谱图像拟合, 经信噪比分析后可知, 特征光谱图像比全波段红外光谱图像的信噪比高。分别使用模糊算法和光谱角测度对拟合图像进行处理, 结果表明模糊算法的实时性和准确性优于光谱角测度。

关键词 光谱; 特征光谱图; 模糊识别; 导弹尾焰; 云层大气背景

中图分类号 E955

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0230002

Fuzzy Recognition of Missile Plume in Characteristic Spectral Image

Huang Da, Huang Shucui, Zhao Wei, Lu Yi

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

Abstract The missile boost section has high temperature and large area of plume. The missile can be accurately identified according to the spectrum characteristics of the plume. Applying the plume spectrum into the space-based early warning system can improve the missile defense ability, but the huge spectral information results in a lot of time from obtaining spectral information to identifying spectral information. So, we find the characteristic spectrum which can represent the spectrum of the missile plume, and use fuzzy algorithm to process the characteristic spectrum data, so as to achieve the purpose of accurate and rapid identification. Analysis shows that the characteristic spectrum image has higher signal-to-noise ratio than full band infrared image, and fuzzy algorithm is better than spectral angle measurement (SAM) on real-time and accuracy.

Key words spectroscopy; characteristic spectrum; fuzzy identification; missile plume; cloud background

OCIS codes 300.3700; 300.6340; 040.3060; 280.2470

1 引 言

天基预警系统在导弹防御系统中有着不可替代的作用, 可及时探测到弹道目标, 为防御准备赢得时间^[1]。传统的天基预警卫星采用近红外波段探测, 虽然保证了实时性, 但虚警和漏警率较高。

物质的光谱具有唯一性, 根据光谱即可判断物质的属性。近年来, 光谱技术已在农业、工业、军事等领域得到了应用^[2]。将光谱技术引入天基预警探测系统, 可提高系统对弹道目标识别的准确率, 但光谱成像在预警系统中耗时较长。引入导弹尾

焰特征光谱成像技术, 既提高了检测正确率又保证了实时性。

导弹尾焰特征波段处的辐射强度相比其他波段处具有强辐射特征, 且所选波段处的辐射能区别其他干扰辐射(背景、飞机尾焰等辐射), 其特征波段可在红外、紫外等波段。苑志玮等^[3]利用改进的向前、向后间隔偏最小二乘法在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 处提取了一组包含 5 个波段的导弹尾焰光谱特征波段, 5 个特征波段均在 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 附近。Kuzmin 等^[4]根据混合气体的属性(燃料特性)、尾喷管排放特性、尾焰辐射规律等因素建模, 通过计算机仿真得出一个

收稿日期: 2017-09-08; 收到修改稿日期: 2017-09-14

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

作者简介: 黄达(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事弱小目标探测识别方面的研究。E-mail: 809710379@qq.com

导师简介: 黄树彩(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空天防御系统与工程方面的研究。

E-mail: hsc07118@126.com

列不同参数下的尾焰近红外辐射光谱,其红外特征光谱分布仍在 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 附近。闫磊^[5]研究了导弹尾焰紫外辐射,对 $200\sim 280\ \text{nm}$ 波段的光谱进行了分析。

本文尝试在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 范围内选出特征波段,根据大气传输规律、目标灰度散焦原理、光谱线型唯一等确定经验模型,再根据经验模型选用恰当的隶属规则、论域中心和论域范围。使用确定的模糊算法对含有弹道目标的特征谱图像进行检测,结果表明该算法可以在实时性要求下准确检测出目标。

2 特征光谱图像的合成

2.1 背景光谱分析

天基探测背景中包含大面积的云层、大气^[6],对云层、大气和干扰物(飞机尾焰光谱)的光谱特征进行分析。

大气的辐射主要源于反射、散射各种强辐射体的辐射。强辐射体主要包含太阳、导弹尾焰、日耀云等^[7],其辐射强度非常低,对目标的正确检测影响较小。图 1(a)为大气近红外光谱曲线。

云层含有大量水分子,吸收太阳能后具有一定的能量,可向各方向发出辐射能;加之对太阳光的反射,形成了其特有的光谱。云层光谱在近红外波段具有强的正向散射^[7],所以探测器、云层、太阳位置对云层光谱的影响很大。图 1(b)为某一状态下云

层的近红外光谱曲线,该谱线的辐射强度是经过增强处理的,旨在对合成的光谱图像造成较大干扰,检验算法的有效性。

喷气式飞机尾焰与导弹尾焰的很多特征很相似。喷气式飞机尾焰中含有大量水、二氧化碳分子和一定量的金属元素,但其体积、温度等比导弹尾焰的小,所以辐射强度相对较弱^[7]。图 1(c)为两种不同型号飞机尾焰近红外光谱曲线。

2.2 目标光谱分析

导弹尾焰具有高温、大面积、含多种物质的特性^[8]。在相同条件下(运动状态、天气条件、卫星探测角度等),不同型号的导弹尾焰具有不同的光谱,不同条件下(运动状态、天气条件、卫星探测角度等)同一导弹尾焰也可能具有不同的光谱^[9]。因包含大量的水、二氧化碳和一定量的金属元素,导弹尾焰在 $2.7, 4.3\ \mu\text{m}$ 以及其他少数波段处具有区别于其他属性物体的强辐射,本研究将这些具有强辐射的波段定义为导弹尾焰特征波段。通过对这些特征波段进行实时检测,可大大提升检测效率。图 1(d)是两种不同类型导弹尾焰的近红外辐射高光谱曲线。

2.3 特征光谱图像分析

光谱图像是一种包含空间和波长的三维图像,根据光谱仪的精度可将光谱图像分为多光谱、高光谱和超光谱图像^[10]。本研究使用的光谱数据属于高光谱数据,精度为 $0.1\ \text{nm}$ 。

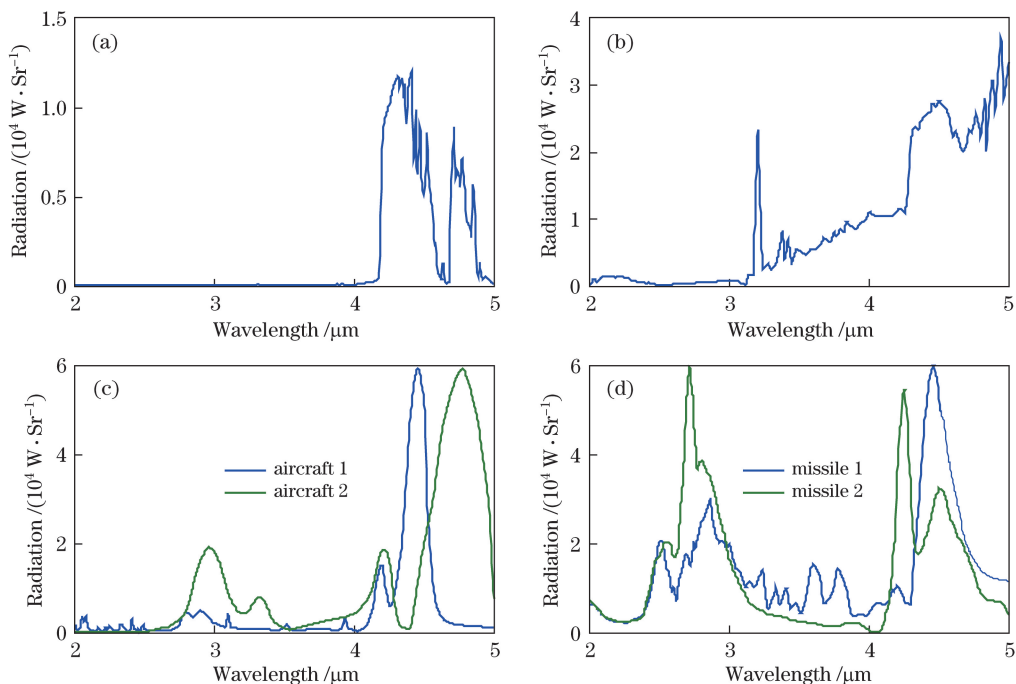


图 1 不同物质的光谱曲线。(a)大气;(b)云层;(c)飞机尾焰;(d)导弹尾焰

Fig. 1 Spectra of different substances. (a) Atmosphere; (b) cloud; (c) aircraft plume; (d) missile plume

根据图 1 所示的各光谱曲线, 选择出导弹尾焰的特征波段, 并拟合出具有三维信息的光谱图像。拟合方法如下:

1) 以一幅真实的红外图像为模板, 确定云层和大气的分布。对红外图像进行灰度处理, 使每个像素值在区间 $[0, 1]$ 之内。在处理后的图像中, 越亮的区域像素越接近 1, 属于云层的概率越大, 越暗的部分越接近 0, 属于大气的概率越接近 1。红外模板如图 2(a)所示。

2) 构造背景的特征光谱图。在所选波段内, 对图 1 中大气、云层的光谱辐射值积分, 按照拟合方法 1) 中的规律, 对各波段的积分值与上述模板进行乘积运算, 得到背景的特征光谱图, 并在此基础上对各个像素加上幅值为 ± 0.25 的高斯噪声。合成的红外(全波段)灰度背景图如图 2(b)所示。

3) 构造目标的特征光谱图。参考图 1 中的光谱, 对导弹尾焰、飞机尾焰特征波段内的辐射进行积分, 将积分值散布到与模板大小相同的矩阵中构成目标光谱图。目标(导弹尾焰)与干扰物(飞机尾焰)的分布如图 3 所示, 其中上三行是导弹尾焰, 上三行中的左三列和右三列分别为一种导弹的尾焰; 下三行是飞机尾焰, 其中左三列和右三列分别为一种飞机的尾焰。像素均为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$, 相比背景来说属于小目标, 与实际探测中导弹尾焰所占像素相近。

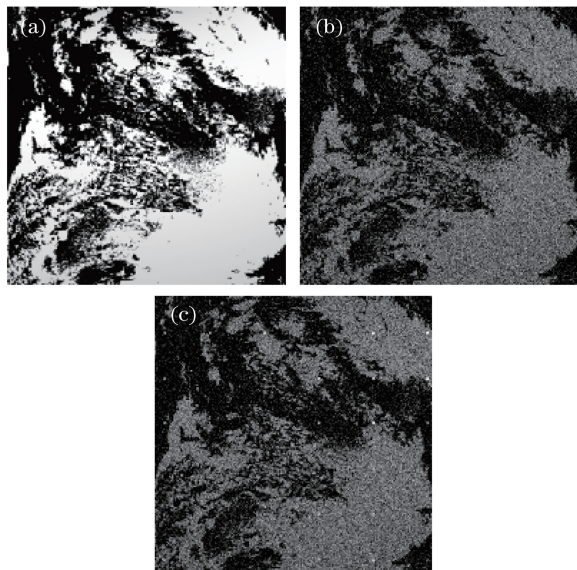


图 2 合成的红外图像。(a)红外背景模板;
 (b)合成的红外灰度背景图;(c)合成的含目标的红外灰度图
 Fig. 2 Synthetic infrared images. (a) Infrared background template; (b) synthetic infrared gray background image; (c) synthetic infrared gray image containing target



图 3 目标及飞机的分布图
 Fig. 3 Distribution of target and aircraft

4) 合成含目标的特征谱图像。对目标特征光谱图和背景特征光谱图分别加权, 然后融合, 形成融合的特征谱图像。融合采用表达式 $H_\lambda = \alpha B_\lambda + \beta T_\lambda$ 进行计算, 其中 B 为背景辐射, T 为目标辐射, H 为合成图像辐射, λ 为波段, α 和 β 为权值。合成的含目标的红外灰度图如图 2(c)所示, 该图是按目标 0.5 的比例融合的红外图像, 即: $\alpha = \beta = 0.5$ 。从红外图像中可以看出, 目标与背景难以区分, 目标属于弱小目标。

图 1 所示的光谱波段为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$, 根据特征光谱的定义, 将 $2.675 \sim 2.691 \mu\text{m}$ 、 $2.701 \sim 2.720 \mu\text{m}$ 、 $2.744 \sim 2.760 \mu\text{m}$ 、 $2.847 \sim 2.866 \mu\text{m}$ 、 $4.854 \sim 4.873 \mu\text{m}$ 波段看作是所选的特征波段。各物质在特征波段的辐射值见图 4, 所列的 5 个波段并不是严格意义上的特征波段, 此处旨在验证算法的可行性和效果。特征波段的选择可依据下列条件: 1) 根据导弹尾焰所含物质的成分, 可将选择范围扩至紫外、红外等波段; 2) 在所选波段的导弹尾焰相比背景和干扰物(飞机尾焰)具有更强的辐射; 3) 波段个数不宜过多, 一般约为 5 个, 否则会使预警系统难以满足实时性。最佳波段(特征光谱)的中心波长、波段个数、波段带宽、光谱精度等仍需要进一步研究。

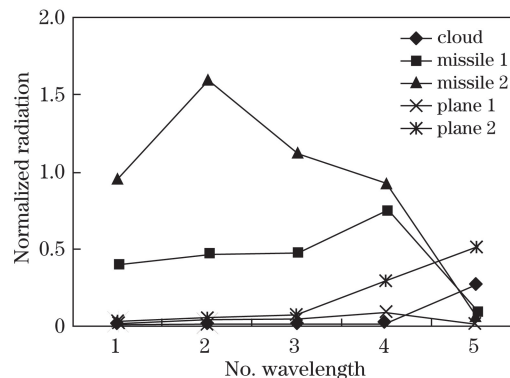


图 4 各物质在所选波段的辐射值
 Fig. 4 Radiation value of each object at selected bands

拟合得到的特征多光谱图像如图 5 所示。目标在某些或某个波段呈孤立的亮点,这是因为导弹尾焰在所选波段范围内的相对背景和干扰物等

具有强辐射,这会提高检测效率,使检测难度相对红外检测难度有所降低。可见,特征波段的选择十分重要。

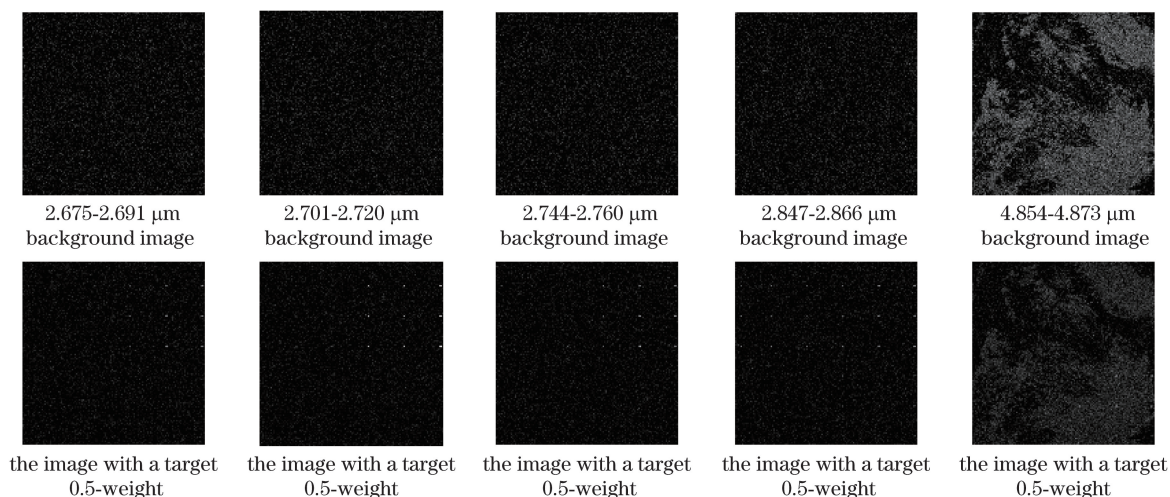


图 5 拟合得到的特征多光谱图像

Fig. 5 Characteristic multispectral images obtained by fitting

从信噪比角度可衡量特征光谱图像的优势,信噪比的表达式为 $r_{SNR} = |U_t - U_b| / \delta_b$,其中 U_t 为目标灰度均值, U_b 为背景灰度均值, δ_b 为背景灰度标准差。

根据上述信噪比的表达式可分别计算出合成红外图像与合成特征光谱图像的信噪比,结果如表 1 所示。分析表 1 中的数据可以发现,所选波段特征光谱图像的信噪比相对全波段红外图像的信噪比高很多,这进一步说明导弹尾焰特征光谱波段的选择具有重要意义。

表 1 拟合图像的信噪比

Table 1 Signal-to-noise ratio of fitted images

Image	U_t	U_b	δ_b	r_{SNR}
Synthetic infrared image	0.93	0.2306	0.2048	3.41
	1.07	0.0040	0.1000	10.66
	0.83	0.0050	0.1000	8.25
Synthetic spectral image	0.38	0.0050	0.1001	3.76
	0.55	0.0075	0.0990	5.47
	0.28	0.1560	0.1560	0.79
Average of the synthetic spectral image	3.11	0.1775	0.5551	5.23

3 经验知识

经验知识是模糊算法的核心部分,好的经验知识能够使识别变得快速、准确,所以有必要对经验知识进行分析推论。

3.1 传输模型

数据库中的光谱辐射有两种形式,一种是源辐射在大气中传输(吸收、散射)并经探测器处理后得到的光谱,另一种是源辐射直接产生的光谱。待识别光谱与数据库光谱是同一种形式才能确保识别的准确性。如果数据库采用第一种形式的光谱,则需要根据大气传输规律对源光谱进行分析得到大气传输后的光谱,该方法可以提高系统的检测速度。如果数据库采用第二种形式的光谱,则需要根据大气传输规则对探测器测得的光谱进行反演^[11],推算出源光谱,以保证探测的正确率。

辐射在介质中传输时,起衰减作用的是介质对辐射的吸收、散射,因此传输模型可从吸收、散射角度考虑^[7]。朗伯定律的辐射传输数学表达式为 $P_\lambda(x) = P_\lambda(0) \exp\{-[a'(\lambda)n_a + \mu'(\lambda)n_\mu]x\}$,其中 P 为辐射源的辐射功率, x 为传输距离, λ 为波段, a' 和 μ' 分别为单位浓度的吸收系数和散射系数, n_a 和 n_μ 分别为介质中吸收元的浓度和散射元的浓度。

导弹在助推段要经过大气层内和大气层外,对于大气层内的辐射需要进一步研究,以找到不同地区、气候、季节、天气等的大气传输方程;而大气层外的辐射传输近似为真空传输,即 $P_\lambda(x) = P_\lambda(0)$ 。

传输模型的确定可使模糊算法的论域中心更接近所测目标的辐射值(或灰度值)。本实验中光谱图像是通过拟合得到的,设背景的衰减权值为 0.5、目标的衰减权值为 0.5 来进行目标背景融合,用以代

替辐射传输规律,此处传输规律与融合规律相同。

3.2 灰度模型

目标的红外图像具有散焦现象^[12],即目标满足:

$$h(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi d^2}, & x^2 + y^2 < d^2 \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (1)$$

式中的 (x,y) 表示图像中的位置坐标, d 是由目标距离和成像系统决定的参数。灰度扩散模型示意图如图6所示。

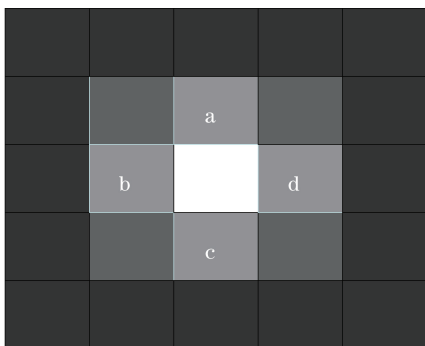


图6 灰度扩散模型示意图

Fig. 6 Sketch map of gray diffusion model

灰度图像的像素值在区间 $[0,1]$ 内变化,将红外图像灰度化,再经过模糊算法处理,处理后图像中的像素值即代表导弹概率,灰度模型可提前预知目标的扩散形状,即概率分布,据此可对检测结果进行验证。

3.3 光谱模型

光谱模型没有明确的数学表达式,需要通过导弹发动装置、尾喷装置、燃料成分、运动状态等信息进行分析,才能仿真出尾焰在各状态、各波长下的辐射强度^[13]。光谱模型可对各波段论域中心起到参考作用,也可通过线型起伏对检测结果进行验证。

4 算法的应用

模糊算法的关键是论域、隶属函数的确定,论域中心可根据传输模型和光谱模型确定,所选相邻波段论域中心的相关性应与光谱模型相邻波段辐射值的相关性近似,论域范围、隶属函数可根据灰度扩散模型确定。算法流程图如图7所示。

基于目标灰度散焦模型,此处采用钟形隶属函数,根据图1(d)中导弹尾焰在特征波段的辐射值和传输模型(0.5的比例融合)确定论域中心,确定的论域中心如表2所示,论域范围定义为 $[-0.25,+0.25]$ 。模糊算法识别效果如图8所示。图9为光谱匹配(SAM)效果。

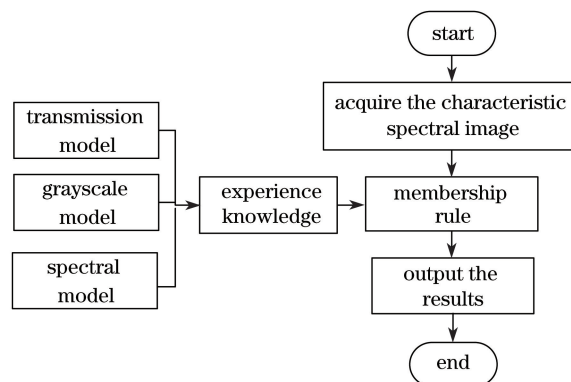


图7 算法流程图

Fig. 7 Algorithm flow chart

表2 各波段的论域中心

Table 2 Domain center of each band

Band	Radiation of missile 1	Radiation of missile 2
Band 1	0.39420904	0.95376472
Band 2	0.463374	1.59767
Band 3	0.47289	1.1250316
Band 4	0.74812138	0.92401774
Band 5	0.12595	0.073062

5 结果分析

从图8可看出,模糊算法在各波段的识别结果均存在一定量的噪声或漏检,但最后的综合结果不存在漏检的情况,且信噪比相对提高很多。

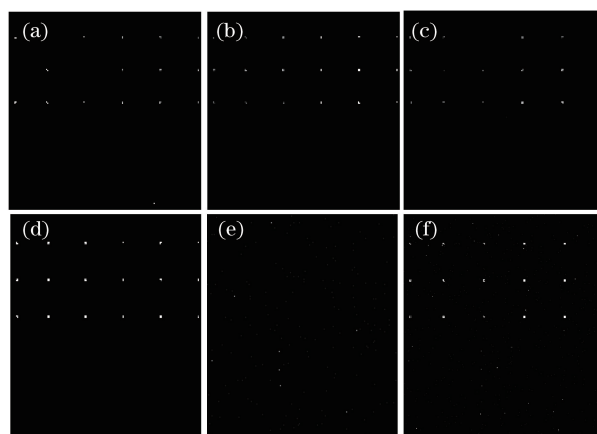


图8 模糊算法识别效果图。(a)波段1;(b)波段2;(c)波段3;(d)波段4;(e)波段5;(f)综合5波段

Fig. 8 Fuzzy algorithm recognition effect diagrams.

(a) Band 1; (b) band 2; (c) band 3, (d) band 4; (e) band 5; (f) integrated band 5

从图9可看出:在5个特征波段下,当相似度设为0.92时,SAM算法可将两种类型的导弹都检测出来,但存在很多孤立的噪声点,此时信噪比非常

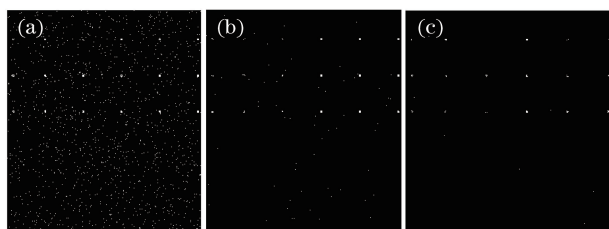


图9 光谱角匹配识别效果。(a)相似度为 0.92;

(b)相似度为 0.98;(c)相似度为 0.99(导弹 1),0.9995(导弹 2)

Fig. 9 Spectral angle matching effect.

(a) Similarity of 0.92; (b) similarity of 0.98;

(c) similarity of 0.99 (missile 1), and 0.9995 (missile 2)

低,较小的目标容易淹没在噪声中;当相似度为 0.98 时,噪声点相对减少很多,但目标存在漏检的情况;当把导弹 1 的相似度阈值设为 0.99、导弹 2 的相似度阈值设为 0.9995 时,噪声点在很大程度上被抑制,但目标的漏检率略高。这种检测效果也进一步证实了拟合光谱图在很大程度上保持了物质的光谱特性,具有一定的合理性。

模糊算法利用目标灰度值(辐射值)设置了论域,操作简单,实现容易。SAM 算法只需考虑光谱线型的相似度,操作简单,无需考虑辐射的变化,只需要数据库的支持。模糊算法与 SAM 算法相比较,具有如下优缺点:

1) 模糊算法的实时性强。首先模糊算法不需要数据库的支持,且操作对象是以单帧图像为单元的,而 SAM 需要大数据库的支持,操作对象是每个像素的光谱。本次试验 SAM 算法平均用时 1.363 s,在相同的条件下,模糊算法用时 0.446 s,且此处 SAM 所用数据库是拟合图所用的原光谱(只有 2 组数据),随着数据库的丰富,更难以满足实时性的要求。

2) 模糊算法易实现。模糊算法的阈值是一个区间(论域),而 SAM 算法的阈值是一个数,且 SAM 需要建立各种导弹在各种状态下的光谱数据库。相比之下,模糊算法更容易实现。

6 结 论

特征光谱图像在数据量小的前提下有效地利用了光谱的特征信息,加之模糊算法的快速、模糊、不需要数据库支持等特点,使得系统识别的实时性和准确性得到了保证。在缺少光谱数据的前提下,通过对目标、背景分析,找出导弹尾焰的特征光谱波段,并进行特征光谱图像拟合,以所拟合图像为基础数据,使用模糊算法和 SAM 算法对数据进行处理

分析,进而检测出目标。从检测结果来看,模糊算法的实时性和信噪比都优于 SAM 算法。

在实际应用中,模糊算法需要专业的经验知识,这需要从大气传输、波段选择、成像模型、尾焰光谱等多方面综合考虑,具有一定难度。

参 考 文 献

- [1] Huang S C, Ling Q, Wei D Z, *et al.* Ballistic target detection in infrared multispectral imagery[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 142-147.
黄树彩, 凌强, 韦道知, 等. 红外多光谱图像弹道目标检测算法[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 142-147.
- [2] Stephanie S L, Debbi B, Miguel F, *et al.* The TRWIS III hyperspectral imager-instrument performance and remote sensing applications[C]. SPIE, 1998, 3438: 13-22.
- [3] Yuan Z W, Huang S C, Xiong Z G, *et al.* Application of characteristic plume spectra in recognition of boost phase ballistic target[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0230001.
苑志玮, 黄树彩, 熊志刚, 等. 尾焰特征光谱在主动段弹道目标识别中的应用[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0230001.
- [4] Kuzmin V A, Maratkanova E I, Zagray I, *et al.* Thermal radiation of heterogeneous combustion products in the model rocket engine plume[J]. Thermophysics and Aeromechanics, 2015, 22(3): 371-386.
- [5] Yan L. Study on the physical mechanism of the ultraviolet radiation of missile tail flame[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
闫磊. 导弹尾焰紫外辐射中相关物理机制的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [6] Bai G W, Zhang P, Zhang W J, *et al.* An efficient method for hyper-spectral infrared atmospheric radiation transfer calculation[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(1): 99-108.
白广文, 张鹏, 张文建, 等. 一种高效计算高光谱分辨率红外大气辐射传输的方法[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(1): 99-108.
- [7] 张建奇. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.
- [8] Tzannes A P, Brooks D H. Point target detection in IR image sequences: A hypothesis-testing approach based on target and clutter temporal profile modeling[J]. Optical Engineering, 2000, 39(8): 2270-2278.
- [9] Ni J Z, Cheng Y B, Shen C. Research of the missile plume infrared radiation movement variety detection[J].

- Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2012, 7(6): 632-635.
- 倪家正, 程玉宝, 沈超. 导弹尾焰红外辐射运动变化探测研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(6): 632-635.
- [10] 魏芳洁. 高光谱图像波段选择方法的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [11] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation[M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 2002.
- [12] Yang C C, Tian J W, Ye J, *et al.* Simulation of space targets imaging for a space based optical imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2410-2414.
- 杨长才, 田金文, 叶瑾, 等. 天基光学成像系统空间目标成像模拟技术 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2410-2414.
- [13] Devir A, Lessin A, Cohen Y, *et al.* Comparison of calculated and measured radiation from a rocket motor plume[C]. 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2001.