

基于成像光谱技术的主动段弹道目标检测与识别方法

吴建峰, 黄树彩, 康红霞, 钟宇, 于强, 赵炜

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

摘要: 弹道目标检测与识别问题是天基红外预警系统的核心难题之一。针对主动段弹道目标的检测和识别问题, 分析了传统的基于空间和时间特征信息的弹道目标检测与识别方法。利用目标辐射空间与光谱的一致性, 提出一种基于成像光谱技术的主动段弹道目标检测与识别方法, 将空域目标检测和谱域目标识别两个环节进行联合处理。实验证明, 该方法应用于复杂背景下低信噪比的红外弱小目标图像序列能得到较理想的结果, 算法检测概率高、虚警概率低、具有较强的实时性。

关键词: 弹道目标; 目标检测与识别; 成像光谱技术; 光谱匹配

中图分类号: V271.4; TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)04-0057-05

Imaging Spectral Technology Based Detection and Recognition of Boost-Phase Ballistic Target

WU Jian-feng, HUANG Shu-cai, KANG Hong-xia, ZHONG Yu, YU Qiang, ZHAO Wei

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

Abstract: Ballistic target detection and recognition is one of the core difficult problems of Space-Based Infrared System (SBIRS). Aiming at the problem of detection and recognition of boost-phase ballistic target, the traditional methods based on spatial and temporal characteristic information were analyzed, and the disadvantages of the methods were pointed out. According to the consistency of the target radiation in spatial dimension and spectral dimension, an integrated method for ballistic target detection and recognition was put forward based on imaging spectral technology, in which integrated treatment was made for target detection and recognition in spectral domain spectral domain. Experiment results show that this method can obtain good result toward low SNR infrared image sequence under complex background, the algorithm has high detection probability, low false-alarm probability and fine real-time performance.

Key words: ballistic target; target detection and recognition; imaging spectral technology; spectral matching

0 引言

由于大气辐射对星载红外探测器的影响, 天基预警红外图像中包含有严重的起伏背景。同时, 由于要求成像距离远, 目标在图像上只占一个像素左右, 且强度较弱, 这就给弹道目标探测带来了很大的难度。因此, 主动段弹道目标的检测与识别问题, 是天基红外预警卫星信息获取与处理的核心难题之一。

目前, 传统的基于红外成像的目标检测与识别的主要方法是以宽带探测为基础, 利用目标的空间和时

间特征信息(形状大小、灰度分布和运动状况)的联合处理来进行检测与识别^[1]。在天基红外预警卫星的实际应用过程中, 由于成像距离远和光学空间分辨率的限制, 以辐射能量为基础的空间信息并不能提供足够的目标特征, 一些局部光谱信号差异很容易在宽波段积分信号中被掩盖, 导致在某些窄带特征波段具有明显差异的目标和背景不能被有效区分, 从而影响了宽带红外成像探测系统的应用效能。随着窄带成像光谱技术的物理实现, 把红外光谱信息融入到现有的基于空间和时间特征信息的检测与识别技术之中, 已经成为一个重要的发展方向^[2-3]。

本文针对主动段弹道目标的检测和识别问题, 提出了一种基于成像光谱技术的主动段弹道目标检测与识别方法。利用光谱图像“图谱合一”的技术特点, 空

收稿日期: 2014-06-04

修回日期: 2014-07-18

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2012JM8020)

作者简介: 吴建峰(1981—), 男, 陕西扶风人, 博士生, 研究方向为空间协同探测与智能信息处理技术。

域目标检测和谱域目标识别两个环节进行联合处理,从而达到提高系统目标检测与识别的快速性和准确性的目的,为处理主动段弹道目标检测与识别问题提供了一种新的思路。

1 传统的弹道目标检测与识别方法

1.1 弹道目标检测方法

目前,针对天基红外图像处理及弹道目标检测算法相对较少,已有的算法如自适应背景预测、数学形态学方法、移动管道滤波等^[4],其主要思想是利用红外图像序列联合“时间-空间”多帧信息进行目标检测,按照“背景抑制→阈值分割→多帧图像关联”的步骤进行图像处理^[5]。这些算法所基于的主要假设是:1)在空间域,短时间内点目标灰度值可近似认为不变;2)在时间域,短时间内点目标的运动速度和方向可近似认为不变。基于时空滤波的弹道目标检测流程如图1所示。

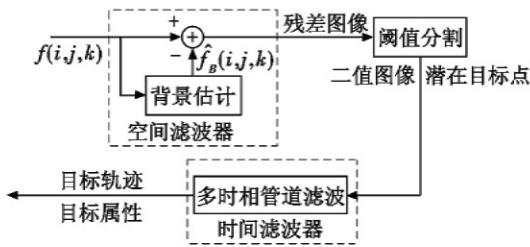


图1 基于时空滤波的弹道目标检测流程

Fig.1 Ballistic target detection process based on temporal/spatial filtering

1.2 弹道目标识别方法

目前,针对弹道目标的识别问题,主要是利用目标的多特征(温度、灰度、运动)信息来进行融合识别的,

大部分研究也主要集中在对中段弹道目标的识别^[6]问题上。美国早期的国防支援计划(DSP)和新一代的天基红外系统(SBIRS)基本上都是采用特征数据库(模板)匹配^[7-8]的方法进行目标识别,这主要是由导弹本身的特性及预警系统的特点决定的。尤其是在单星情况下,不能形成立体观测,必须依靠数据库。基于特征数据库的弹道目标识别流程如图2所示。

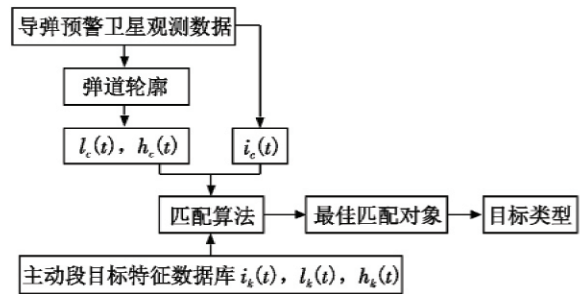


图2 基于特征数据库的弹道目标识别流程

Fig.2 Ballistic target recognition process based on characteristic data library

2 基于成像光谱的弹道目标检测与识别方法

成像光谱技术将成像技术和光谱技术结合在一起,在对目标的空间特征成像的同时,对每个空间像元在窄波段内进行光谱覆盖,形成“图像立方体”数据,其中,二维表征空间位置,另外一维表示光谱波长^[9]。图像立方体的每一层都是一幅图像,对应于一个光谱波段,每个像素点位置对应一个观测向量,这个观测向量的数值按照不同波段依次排列就可形成一条光谱曲线,不同的物质成份对应不同的光谱曲线特征。成像光谱基本原理如图3所示。

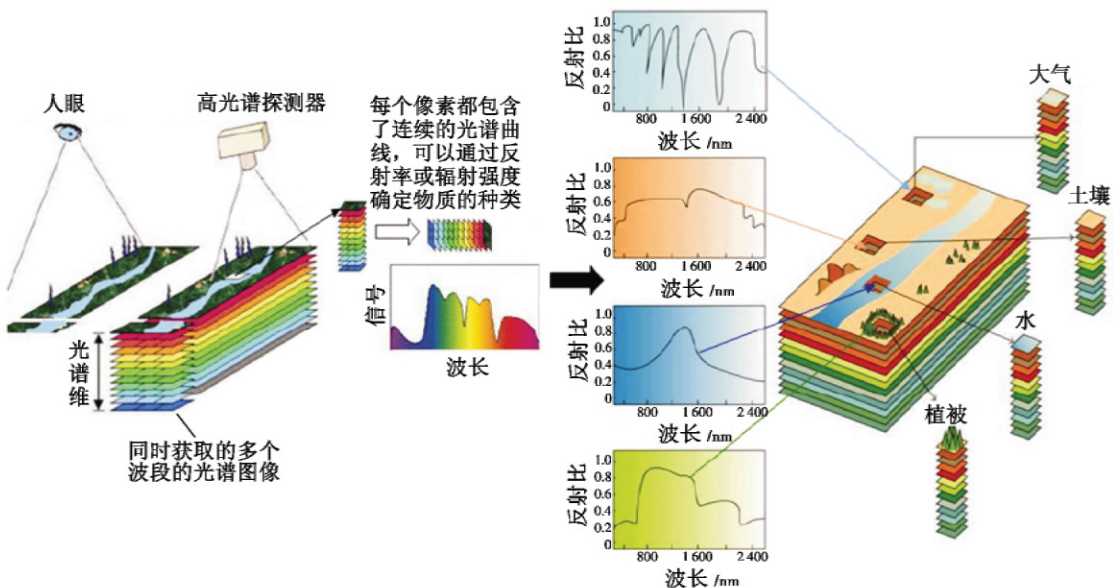


图3 成像光谱基本原理

Fig.3 The principle of imaging spectral

导弹推进剂燃烧后的主要产物是水和二氧化碳,这两种产物的结构决定了导弹尾焰在 $2.7 \mu\text{m}$, $4.3 \mu\text{m}$ 附近有较强的红外辐射,具有强烈的线谱特征^[10-11]。由于光谱信息本身是由物体内在的性质决定的,所以通过对物体光谱信息的分析,可以获得通常其他方法不能获得的目标固有属性,因而代表物体固有属性的光谱差异信息可以作为主动段弹道目标检测与识别的一种重要手段。

2.1 基于空谱滤波的弹道目标检测与识别方法

由于光谱图像包含了观测场景中的空间信息和光谱信息,具有“图谱合一”的特性^[12]。与一般的图像处理相比,光谱图像处理除了可以利用空间信息之外,还可以利用光谱信息。因此可以考虑将空域目标检测和谱域目标识别两个环节进行联合处理。

具体地,在空域上,首先利用空间滤波器对获得的光谱图像进行空间滤波(背景抑制),然后对背景抑制后的残差图像进行全局或分块阈值分割,得到含有少量疑似目标点的二值图像,进而得到疑似目标点在图像中的位置信息。在谱域上,将疑似目标点的测量光谱与建立的弹道目标特征光谱数据库(参考光谱)进行光谱匹配识别,从而区分不同推进剂的类型和组份含量,进而确定弹道导弹的类型和型号。基于空谱滤波的主动段弹道目标检测与识别处理流程如图4所示。

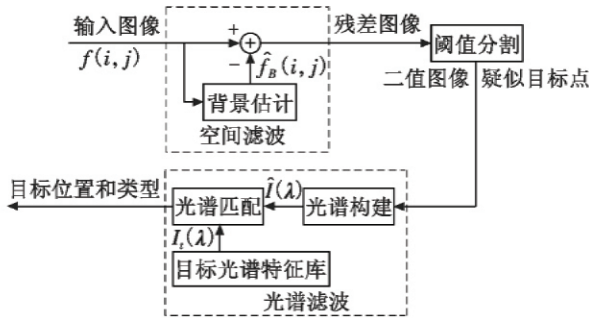


图4 基于空谱滤波的主动段弹道目标检测与识别流程
Fig.4 Boost phase ballistic target detection and recognition process based on spatial-spectral filter

2.2 光谱匹配识别算法

光谱匹配识别算法的基本思想是将图像像元光谱与参考光谱相比较,以某种测度函数度量它们之间的相似性或相关性程度,从而对不同物质进行识别^[13]。测度越小,表明图像像元光谱与参考光谱越相似,归类为目标的准确率越高。常用的光谱相似性测度主要有欧氏距离(Euclidean Distance, ED)、光谱角(Spectral Angel Match, SAM)、光谱信息散度(Spectral Information Divergence, SID)等^[14],这里采用一种基于光谱角与光谱信息散度两种测度融合的匹配识别算法。

假设参考光谱向量为 X ,像元光谱向量为 Y ,融合

光谱角与光谱信息散度的匹配算子为

$$RH(X, Y) = \alpha SAM(X \cdot Y) + \beta SID(Y \cdot X) \quad (1)$$

式中: $SAM(X \cdot Y)$ 为光谱角; $SID(Y \cdot X)$ 为光谱信息散度; α 和 β 为可调整的正系数,且 $\alpha + \beta = 1$ 。

调整系数 α 和 β 为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{SIDn}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{SAMn} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{SIDn}} \\ \beta = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{SAMn}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{SAMn} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{SIDn}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, N 为光谱图像像元数。

参考光谱向量 X 与像元光谱向量 Y 之间的光谱角为

$$\theta_{SAM}(X, Y) = \arccos\left(\frac{\langle X, Y \rangle}{\|X\| \|Y\|}\right) \quad (3)$$

式中, θ 为图像像元光谱与参考光谱之间的夹角(光谱角),值域为 $0 \sim \pi/2$ 。当 $\theta = 0$ 时,表示两个光谱完全相同;当 $\theta = \pi/2$ 时,两个光谱完全不同。

参考光谱向量 X 与像元光谱向量 Y 之间的光谱信息散度为

$$SID(X, Y) = D(X \cdot Y) + D(Y \cdot X) \quad (4)$$

式中, $D(X \cdot Y)$ 为参考光谱向量 X 相对于像元光谱向量 Y 的信息熵。

3 仿真实验与结果分析

仿真实验选取两种典型弹道导弹的光谱辐射归一化数据曲线作为参考光谱仿真实验数据,如图5所示。波段范围为 $2.7 \sim 2.9 \mu\text{m}$,光谱分辨率 10 nm ,共20个波段,形成两型弹道导弹的特征光谱数据库。

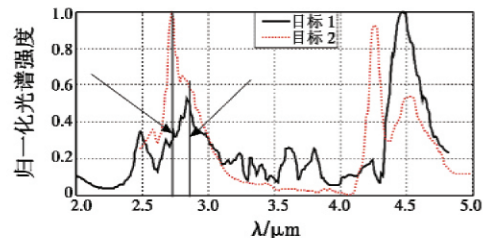


图5 典型弹道导弹归一化光谱辐射曲线
Fig.5 The normalized data curve of typical ballistic missile spectral radiation

仿真时在8帧红外背景图像序列中添加目标,图像大小为 $160 \times 160 \text{ pixels}$,目标大小占一个像素,运动速度为1像素/帧,运动方向为直线运动。针对真实目标1,添加的3个仿真目标像素点位置为 $(60, 30)$ 、 $(90, 90)$ 、 $(140, 70)$ 。针对真实目标2,添加的3个仿

真目标像素点位置为(60, 110)、(90, 120)、(140, 140)。图6a为原始红外背景图,图6b为添加了目标的第一帧图像。

首先对8帧红外图像序列进行高通滤波,再对背景抑制后的残差图像进行分块阈值分割,图6c为阈值分割后的第一帧二值图像,对8帧二值图像序列采用移动管道滤波方法检测得到的目标轨迹如图6d所示。

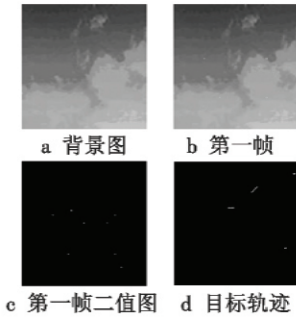


图6 基于时空滤波的目标检测结果
Fig.6 Target detection results based on temporal-spatial filtering

从图6c、6d可以看出,经过空间滤波后,图像中含有8个疑似目标点。经过8帧图像关联时间滤波后,图像中仍然含有2个虚警点。

接下来,对经过空间滤波后的二值图像进行光谱滤波,即通过光谱匹配识别算法完成疑似目标点像元光谱与参考光谱的匹配识别。分别应用SAM、SID和光谱融合匹配算法RH对疑似目标点光谱数据进行匹配识别,得到的仿真结果如图7所示,3种算法的ROC特性曲线如图8所示。

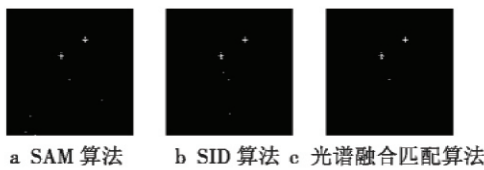


图7 光谱匹配识别结果
Fig.7 The results of spectral matching recognition

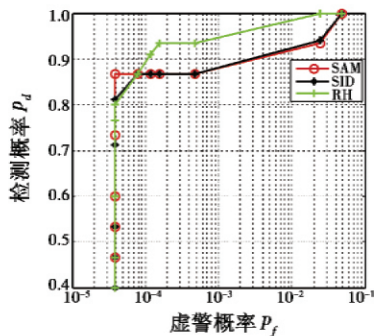


图8 3种算法的ROC特性曲线
Fig.8 ROC characteristic curves of three algorithms

从图7可以看出,采用光谱波形匹配进行目标类

型识别的方法是可行的,可以显著减少图像处理的帧数,提高系统的目标快速检测和准确识别能力。从图8可以看出,在相同的虚警概率下,SAM与SID算法的检测概率大体相等,而光谱融合匹配算法RH的检测概率最大,说明融合匹配识别方法效果更佳。

4 结束语

本文在分析传统的基于时空信息的弹道目标检测与识别方法的基础上,利用光谱图像“图谱合一”的技术特点,提出了一种基于成像光谱技术的主动段弹道目标检测与识别方法。这种方法充分利用了弹道目标辐射空间与光谱的一致性,在传统宽带红外成像反映物体存在的三维(二维空间域、一维时间域)图像(序列)信息的基础上,增加了一维光谱信息,为弹道目标的检测与识别提供了更加丰富的信息资源。

需要注意的是,该方法的实现必须要利用目标特征光谱数据库对测量光谱进行光谱匹配。因此,深入研究弹道目标及大气背景在特定波段的光谱辐射特性,不断建立和完善不同型号弹道导弹的特征光谱数据库是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] 孟祥龙,张伟,丛明煌,等. 天基红外图像的点目标检测[J]. 光学精密工程,2010,18(9):2094-2100. (MENG X L, ZHANG W, CONG M H, et al. Detection of point targets in space-based infrared images[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9):2094-2100.)
- [2] 武春风,张伟,李洁,等. 基于时空信息的红外成像系统在探测识别目标时所面临的问题及分析[J]. 光学技术,2005,31(2):231-234. (WU C F, ZHANG W, LI J, et al. Problems and its analysis of infrared imaging detection and identification facing[J]. Optical Technique, 2005, 31(2):231-234.)
- [3] 许洪,王向军. 多光谱、超成像光谱技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程,2007,36(1):13-17. (XU H, WANG X J. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1):13-17.)
- [4] 李勤. 红外序列图像弱小运动目标检测新方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006. (LI M. Research on novel detection algorithms for moving infrared dim small targets[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.)
- [5] 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. (HU Y S. Research on infrared dim and small target detection in clutter environment

- [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.)
- [6] 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. (WU X, ZHOU Y, CUI J, et al. Analyses on infrared optoelectronics recognition technology in missile defense system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(5): 759-766.)
- [7] 赵延,姚康泽,孙俊华,等. 导弹预警卫星目标识别算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(10): 1811-1813. (ZHAO Y, YAO K Z, SUN J H, et al. Research on a new algorithm of missile target recognition of missile early warning satellite system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(10): 1811-1813.)
- [8] 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): 36-39. (GAO S, WANG S, LIU J H. 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): 36-39.)
- [9] 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. (CAO L L, WU C F, HOU Q Y, et al. Survey of target recognition technology based on spectrum imaging[J]. Optical Technique, 2010, 36(1): 145-150.)
- [10] NEELE F. Two-colour infrared missile warning sensors [C]//Proceedings of SPIE, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications II, 2005, 5787: 134-145.
- [11] GOLDBERG A. Dual band infrared imagery of an Atlas 5 launch vehicle in flight [J]. AIAA, 2005, 43(1): 174-183.
- [12] AMINOV B, ROTMAN S R. Spatial and temporal point tracking in real hyperspectral images [C]//IEEE 24th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, 2006: 16-20.
- [13] 王润生,杨苏明,阎柏琨. 成像光谱矿物识别方法与识别模型评述[J]. 国土资源遥感, 2007(1): 1-9. (WANG R S, YANG S M, YAN B K. A review of mineral spectral identification methods and models with imaging spectrometer[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007(1): 1-9.)
- [14] 许毅平. 基于高光谱图像多特征分析的目标提取研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. (XU Y P. Study on object extraction based on multi-feature from hyperspectral image[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.)
- (上接第49页)
- [2] 杨家海,吴建平,安常青. 互网络测量理论与应用 [M]. 北京:人民邮电出版社, 2009. (YANG J H, WU J P, AN C Q. The theory and application of internet measurement [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2009.)
- [3] KUMAR A, XU J. Sketch guided sampling—using on-line estimates of flow size for adaptive data collection [C]//The 25th IEEE International Conference on Computer Communications, 2006: 1-11.
- [4] 张进,鄢江兴,钮晓娜. 空间高效的数据包公平抽样算法[J]. 软件学报, 2010, 10: 2642-2655. (ZHANG J, WU J X, NIU X N. Space-efficient fair packet sampling algorithm [J]. Journal of Software, 2010, 10: 2642-2655.)
- [5] 王洪波,程时端,林宇. 高速网络超连接主机检测中的流抽样算法研究[J]. 电子学报, 2008(4): 810-818. (WANG H B, CHENG S D, LIN Y. On flow sampling for identifying super-connection hosts in high speed networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2008(4): 810-818.)
- [6] 孙昱,夏靖波,赵小欢,等. 基于 LEAST 和 CBF 两级结构的大流检测算法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2014, 42(4): 40-44. (SUN Y, XIA J B, ZHAO X H, et al. LEAST and CBF two-level architecture based algorithm for identifying and measuring large flows [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(4): 40-44.)
- [7] 胡广昌. 基于 Bloom Filters 流抽样算法的研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2010. (HU G C. The flow sample algorithm research based on Bloom Filters [D]. Qufu: Qufu Normal University, 2010.)
- [8] HUBER J. Design of an OC-192 flow monitoring chip [M]. San Diego: University of California, San Diego Class Project, 2001.
- [9] VOELKER G M, SAVAGE S. Cooperative association for Internet data analysis [EB/OL]. [2014-06-23]. <http://www.Caida.org/>.
- [10] 张震,汪斌强,张风雨,等. 基于 LRU-BF 策略的网络流量测量算法 [J]. 通信学报, 2013, 34(1): 111-120. (ZHANG Z, WANG B Q, ZHANG F Y, et al. Traffic measurement algorithm based on least recent used and Bloom filter [J]. Journal on Communications, 2013, 34(1): 111-120.)