

# 基于特征空间显著性的假目标光谱设计

李姝颖, 杜山山, 曾朝阳

解放军理工大学野战工程学院国防科技重点实验室, 江苏 南京 210007

**摘要** 为解决高光谱探测条件下的假目标光谱设计问题,从特征空间中目标显著性的角度分析了假目标的设计原则。区别于其他目标探测,高光谱目标探测是高维数据的处理过程,目标显著性反映在数据经降维处理后形成的特征子空间中。据此提出的假目标设计原则如下。先在特征子空间内设计假目标,使其一方面凸显自身,另一方面则遮掩真目标。而后依据特征子空间与光谱通道的线性关系,通过子空间中假目标与其他目标的相对位置确定假目标的光谱特性。对相关图像的检测表明,这样设计的假目标能够有效降低真实目标的探测效果。相关结论对高光谱隐身技术有一定指导作用。

**关键词** 遥感; 高光谱; 目标探测; 特征空间; 显著性

**中图分类号** TP7 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0128001

## Decoy Spectrum Design Based on Feature Space Significance

Li Shuying, Du Shanshan, Zeng Zhaoyang

*Key Laboratory of Defense Technology, College of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*

**Abstract** To deal with spectrum design for decoys under hyperspectral detection condition, the decoy spectrum design principles were analyzed in term of the feature significance. Different from other detection technologies, hyperspectral detection is a process of multi-dimensional data processing, and the target significance is embodied in feature space formed by dimensionality reduced data. Correspondingly, the proposed spectrum design method for decoys is as follows. The decoy is set in feature space, highlighting itself and shielding real target, and then the spectrum of the decoy is reduced by the relative relation between the decoy and other targets in feature space. The reduction is based on the linear relation between the feature space axis and the original data channels. Target detection results verified the effectiveness of the proposed decoy spectrum design method.

**Key words** remote sensing; hyperspectra; target detection; feature space; significance

**OCIS codes** 280.4788; 280.3420; 040.1880

## 1 引 言

假目标通过迷惑敌方或分散敌方注意力而达成军事隐身技术的目的,是重要的军事隐身手段。为达成目的,假目标应该在目标探测中呈现一定的显著性,同时最好能够有效降低真实目标的显著性。因此假目标的特征设计必须充分考虑其所针对的目标探测方法。高光谱遥感技术的发展是最近几十年来目标探测领域的重大技术成就,现代高光谱遥感技术已经具备从卫星平台探测地面目标细致光谱特征的能力,从而开创了利用特征光谱识别目标的新技术时代<sup>[1]</sup>。高光谱遥感技术迅速在农业、林业、矿业和环境监测等领域得到广泛应用,同时也对军事目标带来空前威胁,是军事隐身技术面临的重大挑战<sup>[2]</sup>。如何有效对抗高光谱遥感探测,是军事隐身技术当前面对的一大难题。

高光谱遥感独特的目标探测方法对军事假目标的光谱设计提出了挑战。普通的彩色图像中,目标的显著性在图像上有直观的反映,因此假目标的设置方法与效果也可以依据相关图像直接进行分析判断。与常

**收稿日期:** 2016-07-28; **收到修改稿日期:** 2016-08-29

**作者简介:** 李姝颖(1990—),女,硕士研究生,主要从事高光谱遥感方面的研究。E-mail: imisswater@163.com

**导师简介:** 曾朝阳(1967—),男,博士,副教授,主要从事隐身技术方面的研究。

E-mail: zengzy1212@hotmail.com(通信联系人)

规探测方法不同,高光谱遥感的结果是高维图像数据,进行目标探测之前,通常要进行数据降维处理,降维后还要选择适当的数据子空间进行目标特征分析。换句话说,在高光谱遥感条件下,目标的显著性体现在经过多重处理的数据子空间上,而不是直观表现在高光谱图像中<sup>[3]</sup>。而经过多重处理的数据子空间,其数据轴的物理含义常常不明确,这导致数据子空间中目标显著性的分析变得异常棘手。总之,高光谱独特的数据结构和处理方式,使得目标显著性的分析方法完全不同于常规方法。相应地,假目标的设计方法也会发生根本性的变化。本文依据高光谱探测的特点,提出一种依据特征空间的显著性来进行假目标光谱设计的方法。

## 2 数据与方法

### 2.1 实验数据

采用的数据为机载平台拍摄的高光谱遥感照片,探测器光谱范围为 380~2500 nm,光谱通道数为 224,光谱分辨率小于 10 nm,空间分辨率约 10 m。从原图中裁减出 150 pixel×150 pixel 的植被背景图作为基础数据,图片经过了大气校正。图中目标的实际大小为 6 pixel×6 pixel,但经过临时的植被遮盖伪装,在图中呈现的大小为 2 pixel×2 pixel。从图像数据中选择三个通道数据形成的 RGB 图像如图 1 方框标记部分所示。

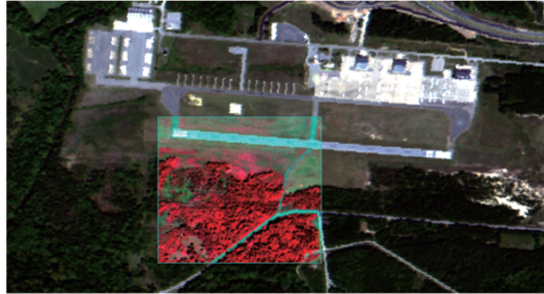


图 1 RGB 显示的航拍高光谱图片

Fig. 1 Original hyperspectral image showed in RGB form

为考察假目标的设置效果,通过修正像素数据的方法在高光谱图像中添加假目标。依据辐射方程<sup>[4]</sup>,高光谱图像中像素数据代表探测器接收到的辐射值,即

$$L(\lambda) = \frac{1}{\pi} E_g \rho(\lambda) t(\theta), \quad (1)$$

式中  $E_g$  为入射到目标表面的辐射亮度,  $\rho(\lambda)$  为目标的光谱反射率,而  $t(\theta)$  是大气上行透过率。由(1)式可知,在相同环境下(太阳辐射和大气透过率相同),高光谱图像中不同物体所对应的像素值与其光谱反射率成正比,因此

$$L_2(\lambda) = L_1(\lambda) \frac{\rho_2(\lambda)}{\rho_1(\lambda)}, \quad (2)$$

式中  $L_1(\lambda)$  和  $L_2(\lambda)$  分别表示已知物体的辐射值与所求物体的辐射值。如果两种物体的光谱反射率已知,又知道其中一种物体的高光谱图像,就可以依据比例关系,由(2)式推导出另一物体的图像像素值。考虑到噪声的存在,可以在(2)式的基础上添加随机噪声项  $\sigma(\lambda)$ :

$$L_2(\lambda) = L_1(\lambda) \frac{\rho_2(\lambda)}{\rho_1(\lambda)} + \sigma(\lambda). \quad (3)$$

### 2.2 研究方法

设置假目标的目的是让敌方认假为真,因此,真目标被探测的过程和特点就是假目标设置的依据。与普通探测方法不同,高光谱图像由于其高维数据特征,对高光谱图像进行目标探测有非常复杂的处理过程,包括图像校正、降噪、辐射定标、波段选择、数据降维、特征选择、目标探测、结果分析等<sup>[5]</sup>。对高维数据的分析而言,这种复杂的处理方式是十分必要的,但也使目标显著性分析和假目标设计变得不再直观。由于高光谱图像已经进行降噪、校正、定标等处理过程,所以研究的重点集中在数据降维和特征分析的影响。

### 2.2.1 MNF 变换

对高光谱图像进行降维的方法很多,最通用的方法是主成分分析(PCA)和最小噪声分离(MNF)变换。PCA 通过对高光谱图像光谱通道的线性组合,把图像信息集中到少量的数据通道内,从而实现数据降维和冗余去除。变换后的图像数据通道是原高光谱图像多个光谱通道的组合,所以其代表的物理意义很模糊。最小噪声分离变换将一幅多波段图像的主要信息集中在前面几个波段,主要作用是判断图像数据维数、分离数据中的噪声,减少处理中的计算量。所不同的是,在最小噪声分离变换中,高光谱图像数据经过两次变换,其目的是对图像噪声作白化处理。有研究表明,采取 PCA 处理多光谱遥感图像效果很好,而相比之下,MNF 变换更适用于高光谱遥感数据<sup>[6]</sup>。因此,采取 MNF 变换对高光谱图像进行降维。经 MNF 变换后得到的通道特征值及第一通道图像如图 2 所示。MNF 变换后会将图像的主要信息集中在前几个通道,而通常第一通道和第二通道集中了主要信息。因此选取 MNF 变换后第一和第二波段构成的散点图,基本上就已涵盖了图像的基本信息。

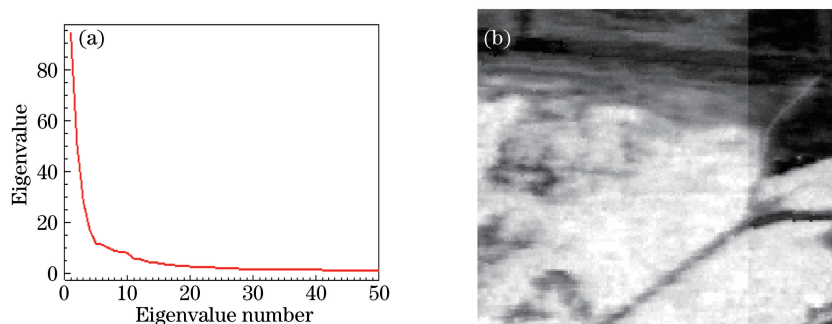


图 2 目标背景图像经 MNF 变换后的 (a) 特征值分布曲线和 (b) 第一通道图像

Fig. 2 (a) Eigenvalue distribution and (b) first channel of the MNF transformed image

### 2.2.2 基于散点图的目标提取

不同的地物具有不同的反射波谱特性,利用这种波谱特性就可以从复杂的背景中区分出不同的地物。对于经过 MNF 变换后的图像,当地物波谱特征越明显、越独特,那么由特定两个数据通道组成的散点图也越独立<sup>[7]</sup>。依据凸面几何理论,可以得知高光谱数据在特征空间中具有凸面单形体结构,位于散点图中的犄角或拐点位置的数据点就是纯粹地物(端元)的光谱特征点<sup>[8]</sup>。

图 3(a)是图 1 经过 MNF 变换后,选取第一、第二数据通道形成的 2D 散点图。图中处于犄角或拐点的点,分别对应原高光谱图像中的林地、道路、裸露地和目标。利用 ENVI 软件自带区域分析工具对散点图进行圈选分析,当将位于散点图边缘位置处的点圈选时会看到放置于背景中并不显著的目标此时很明显地显现出来,如图 3(b)所示。选取 2D 散点图中的目标特征点,找到高光谱图中的对应像素,然后提取这些像素的光谱特征数据,再利用光谱填图等方法,就能够找到包括隐蔽目标在内的其他非显著目标。而从基于 MNF 变换的 2D 散点图上可以看出,由于遮蔽伪装的作用,目标分布在散点图的边缘位置,只在散点图中呈现出零星的点,而且这些点淹没在背景自身的零散特征点之中,并不显著。

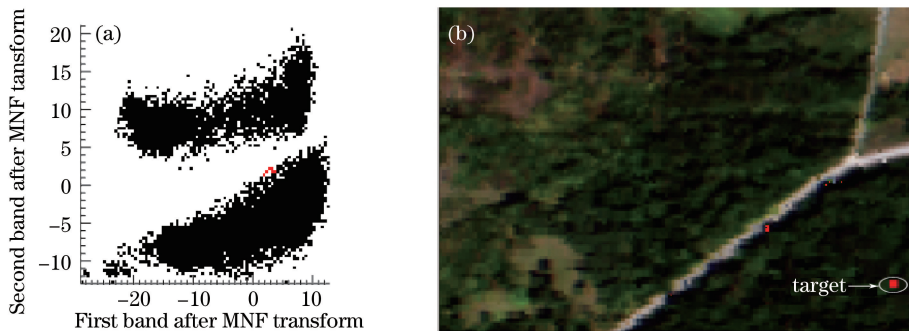


图 3 (a) 高光谱图像的 2D 散点图; (b) 目标位置图

Fig. 3 (a) 2D scatter graph of the hyperspectral image and (b) location of target



### 2.2.3 基于特征空间显著性的假目标光谱设计

军事伪装针对假目标的设计也提出了各种各样的观念,其中最经常使用的标准就是同色同谱,即要求伪装物与目标光谱一致<sup>[9]</sup>。但这种标准是针对常规探测而设计的。与传统方法不同,上述目标高光谱特征的提取过程依据的是 2D 散点图中目标特征的显著性,而不是原图中的直观显著性。既然如此,设计假目标时,也应当考虑其在特征空间的显著性,这就是高光谱探测条件下假目标设计的最大特点。

依据前面的分析,为对抗高光谱探测,假目标的设计应在特征空间突显其显著性<sup>[10]</sup>。既然真实目标在 2D 散点图上有明确的显著性,那么最自然的想法就是,设法使假目标与真实目标具有相同的光谱特性。这样做能够确保在特征空间真假目标无法区分,而且实施起来也比较方便,只要在假目标表面涂覆和真目标一样的涂层即可。这种想法也和伪装上提到的同色同谱不谋而合。通过(1)式和(3)式修改像素来完成假目标的设置,信噪比为 10:1。图 4 就是通过修改部分像素而得到的含假目标的高光谱 RGB 显示图像,为显著起见,图中真假目标都作了标注。与真目标不同的是,假目标需要凸显其显著性,因此没有实施遮蔽伪装。图中假目标的尺寸是 6 pixel×6 pixel。



图 4 添加了假目标的高光谱图像

Fig. 4 Hyperspectral image with added decoy

图 5 显示的是增加假目标之后又经过 MNF 变换得到的散点图和真假目标位置图。不出预料,散点图中真、假目标特征点集中在一起。而与图 3(a)相比较,这里真假目标的显著性大大增强,因此从这张散点图中提取目标的光谱将变得容易,也就是说,这样的假目标凸现了真目标在特征空间的显著性。由于真假目标光谱特性一致,增加假目标后,与真实目标光谱相近的像素显著增加,在特征空间中形成的凸点也就更加明显。

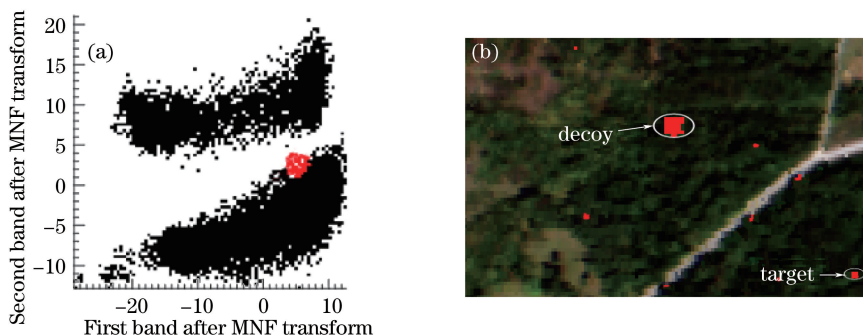


图 5 (a) 含假目标图像的 2D 散点图; (b) 真假目标位置图

Fig. 5 (a) 2D scatter graph of the image with decoys and (b) location of target and decoy

结合高光谱目标探测的特点,提出如下假目标光谱设计方法:先依据特征空间真实目标的显著性,在特征空间设计比真目标更加显著的假目标,而后再依据特征空间中目标及背景地物之间的相互关系,确定假目标的光谱特性。具体来说,就是先在 2D 散点图上分析真目标在哪个方向凸出,而后再在此方向,设计一个更加凸出的假目标,如图 6(a)所示。假目标在特征空间的显著性得到保证,同时,由于假目标的存在,真目标在特征空间的显著性降低,实际上形成了特征空间中假目标对真目标的遮挡效应。

当然,在 2D 散点图中,设计图 6(a)那样的假目标并不困难,关键是如何了解假目标的光谱特性。如前所述,经过降维处理后,特征空间数据通道的意义含糊不清,即图 6(a)中通道一、通道二所代表的意义无法



判断,因此在图 6(a)中标出的假目标,其光谱特性并不能直接得出。但是可以通过特征空间中不同对象的相互关系来确定假目标的光谱。因为数据降维(无论是 PCA 还是 MNF)只是把原有的光谱通道进行了线性组合,所以在降维后的特征空间,不同对象的相对位置实际上代表了其光谱之间的相对关系。以图 6(a)为例,假目标实际上处于道路与草地两种地物之间,因此图 6(a)中假目标的光谱可以用草地和道路的光谱混合实现。图 6(a)中,假目标距草地很近,而距道路很远,这表明假目标光谱中,草地的成分大,而道路的成分小。这样一来,假目标光谱设计的步骤就变为:先对含真目标的图像进行降维处理和散点图分析,然后在散点图添加既能凸现自身又能掩盖真目标的假目标,最后依据散点图中假目标与其他物体的关系,明确假目标的光谱特性。其具体步骤如图 6(b)所示。

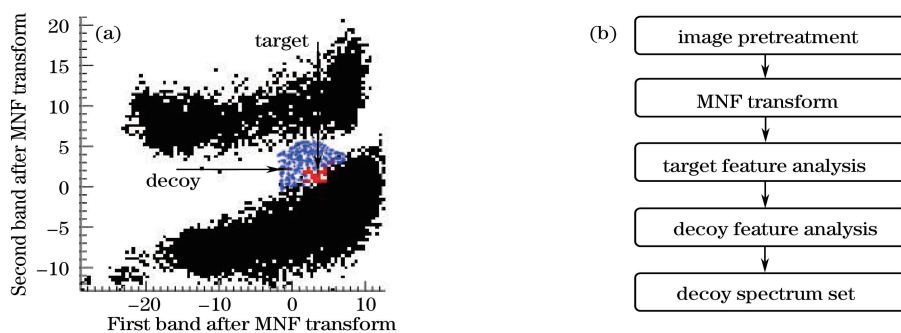


图 6 (a) 在散点图上设置的假目标; (b) 假目标设计流程

Fig. 6 (a) Decoy in 2D scatter graph ; (b) process for decoy design

### 3 结果与讨论

图 7 中假目标的光谱就是按照上述方法设计的。选取图 7 中草地、道路、真目标和假目标的一些像素,分别求这些像素的平均光谱,其结果如图 8 所示。可以看到,假目标与真目标的光谱并不一致,这样设计的目的是避免由于假目标的设置而增加真目标的显著性。这正是我们要特别强调的原则。将此图进行 MNF 变换,取变换后的第一、二通道数据构成二维散点图,如图 9 所示。图 9 中,假目标的特征点形成了明显的凸起,因此具有显著性,很容易被当成目标并被提取光谱曲线。相反,真目标的特征点处于假目标特征凸起的底部,很难被当作端元进行提取,因此也就不容易被发现。因为设计的假目标与真目标之间存在光谱差异性,这就使得假目标数量的设置比较灵活。实验中为了掩盖真目标,设置了 3 个假目标。



图 7 添加了三个假目标的高光谱 RGB 图像

Fig. 7 Hyperspectral RGB image with three decoys

假目标设计的合理性最终要以其对抗目标探测的有效性进行判断<sup>[11]</sup>。分别从图 5(a)和图 9 中提取目标光谱(实际上从图 9 提取到的是假目标光谱,因为真目标已经不凸显了),再采用光谱滤波的方法对图 4 和图 7 进行目标探测,探测结果如图 10 所示。对比这两个图,很显然,按照本文提出的方法设计高光谱假目标,能够显著降低真目标的发现概率,因此提出的是一种合理有效的设计方法。

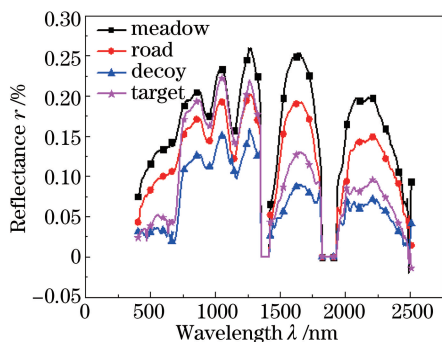


图 8 高光谱图像中不同地物的光谱曲线  
Fig. 8 Spectral curves for different objects

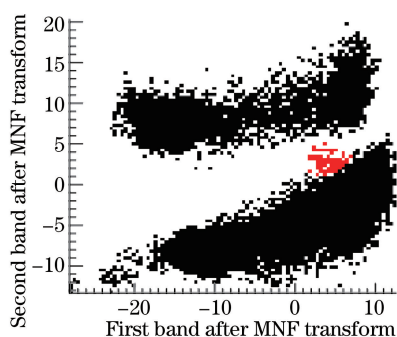


图 9 含三个假目标高光谱图像的 2D 散点图  
Fig. 9 2D scatter graph of the image with three decoys

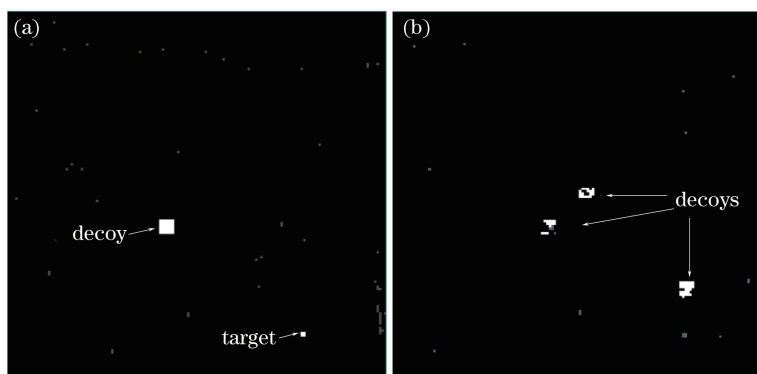


图 10 对(a)图 4(a)和 (b)图 7(b)进行目标探测的结果  
Fig. 10 Target detection results for (a) Fig. 4(a) and (b) Fig. 7(b)

## 4 结 论

鉴于传统意义上的同色同谱假目标设计原则在高光谱探测下面临着失效威胁,提出了基于特征空间显著性的假目标设计原则,将依据这两种原则设计的假目标分别放入相同的高光谱遥感图像中,并利用光谱滤波探测方法对这两幅高光谱图像进行检测。检测结果表明,相较于常规设计原则下的假目标,基于特征空间显著性原则设计的假目标能更有效地降低真实目标的探测效果,能更好地遮掩真目标。此结论对高光谱隐身技术有一定指导作用。

## 参 考 文 献

- [1] 张良培, 张立福. 高光谱遥感[M]. 北京: 测绘出版社, 2011: 80-102.
- [2] Hsu P H. Feature extraction of hyperspectral images using wavelet and matching pursuit [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62(2): 78-92.
- [3] He Songhua, Liu Zhen, Chen Qiao. Research of spectral dimension reduction method based on matrix  $\tilde{\mathbf{R}}$  theory [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0233001.  
何颂华, 刘 真, 陈 桥. 基于矩阵  $\tilde{\mathbf{R}}$  理论的光谱降维方法研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0233001.
- [4] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理办法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] Canham K, Schlamm A, Ziemann A. Spatially adaptive hyperspectral unmixing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4248-4262.
- [6] Yin Wen, Li Yuanxiang, Zhou Zeming, et al. Remote sensing image fusion based on sparse representation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0428003.  
尹 雯, 李元祥, 周则明, 等. 基于稀疏表示的遥感图像融合方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0428003.
- [7] Wang Liguo, Deng Lüqun, Zhang Jing. Endmember selection algorithm based on linear square support vector machines [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3): 743-747.  
王立国, 邓绿群, 张 晶. 基于线性最小二乘支持向量机的光谱端元选择算法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3):

743-747.

- [8] 张 兵, 高连如. 高光谱图像分类与目标探测[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 102-175.
- [9] Johnson R J, Williams J P, Bauer K W. Auto GAD: An improved ICA-based hyperspectral anomaly detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(6): 3492-3503.
- [10] Wu Yiquan, Zhou Yang, Long Yunlin. Small target detection in hyperspectral remote sensing image based on adaptive parameter SVM[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0928001.  
吴一全, 周 杨, 龙云淋. 基于自适应参数支持向量机的高光谱遥感图像小目标检测[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0928001.
- [11] Wu Chao, Wu Yiquan. Target detection in hyperspectral image using projection pursuit based on chaotic particle swarm optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1211003.  
吴 超, 吴一全. 基于混沌粒子群优化投影寻踪的高光谱图像目标检测[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1211003.