

## 基于样本正交子空间的 SAR 目标识别方法

韩征 苏志刚\* 韩萍 吴仁彪

(中国民航大学智能信号与图像处理天津市重点实验室 天津 300300)

**摘要:** 利用合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)获取的目标像进行识别时, 基于子空间的自动目标识别(Automatic Target Recognition, ATR)方法通常是对样本数据的值空间进行操作。当识别相似目标时, 由于彼此的值空间存在较大的交集, 生成的识别模板的可分性较差。该文提出一种 SAR 目标 ATR 方法, 该方法将 SAR 样本数据的正交子空间作为投影空间。因此, 不同类目标样本在投影空间的差异性加大, 能够明显提高识别效果。实验结果表明, 本文方法的识别性能优于其它同类方法。

**关键词:** 自动目标识别; 合成孔径雷达; 特征模板; 正交子空间

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)11-2581-04

## SAR Target Recognition Method Based on Orthogonal Subspace of Samples

Han Zheng Su Zhi-gang Han Ping Wu Ren-biao

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** To identify with the target images obtained by Synthetic Aperture Radar (SAR), those subspace-based methods for Automatic Target Recognition (ATR) are usually based on the range subspace of the samples. When some similar targets need to be distinguished, the corresponding templates are poorly separable because the range subspaces of each other have a big intersection. A method for SAR target ATR is proposed in this paper, which considers the orthogonal complement subspace of the samples as the projection subspaces. Consequently, the difference, between the projections of the different type targets on the projection subspace, is enlarged, which significantly improves the identification performance. Experimental results show that the proposed method is superior to the other similar methods.

**Key words:** Automatic Target Recognition (ATR); Synthetic Aperture Radar (SAR); Feature template; Orthogonal subspace

### 1 引言

由于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天候、全天时工作能力, 日益成为一种重要的遥感手段, 广泛地应用于军事及民用诸多领域。基于SAR的自动目标识别(Automatic Target Recognition, ATR)技术是提高SAR图像利用率的重要技术, 特别是在战场感知方面的应用已成为备受关注的热点问题<sup>[1-3]</sup>。

目前, 基于SAR的ATR技术或是利用模型重构方式、或是利用模板匹配方式来实现<sup>[4,5]</sup>。模板匹配方式主要是根据训练样本形成标准模板, 并利用该模板对测试样本进行分类。为获得较精确的匹配效果, 需要构造大量模板, 这必将导致ATR前期及后期的处理十分复杂。对SAR图像进行特征提取可以

有效去除冗余信息、降低数据维数, 减少所需模板的数目。特征的提取可以由SAR图像直接提取<sup>[6,7]</sup>, 也可由图像的变换域提取<sup>[2,9-11]</sup>。目前利用图像变换域特征构建模板的方法主要有主分量分析(Principal Component Analysis, PCA)<sup>[2,3,8,9]</sup>, 独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)<sup>[2,9]</sup>, 线性判别分析(Linear Discriminant Analysis, LDA)<sup>[3]</sup>, 核主分量分析(Kernel PCA, KPCA)<sup>[10]</sup>, 基于核函数的线性判别分析(Kernel LDA, KLDA)<sup>[11]</sup>以及相应改进方法<sup>[12-14]</sup>。这些变换域特征提取方法都是由数据的值空间进行特征提取, 目的是增大被分类的目标特征在值空间内的差异, 便于提高识别率, 由于不同类目标的值空间仍然存在重叠, 特别是被识别目标的结构相似时, 相应特征模板的可分度偏低, 不利于实现对目标的有效分类与识别。

本文从投影空间构造的角度提出一种新的SAR目标识别方法, 该方法利用训练数据的变换域生成

2008-11-14 收到, 2009-04-06 改回

国家自然科学基金(60736009, 60872110)和国家 863 计划项目(2006AA12Z321)资助课题

\*通信作者

零空间作为投影矩阵，从而使本类目标与其它类目标的测试数据在投影空间上表现出更大的差异性，实现较好的SAR目标识别效果。

### 2 问题描述

拟对  $K$  类目标进行分类，假设第  $k$  类目标有  $N_k$  幅SAR像作为训练样本。将第  $n$  幅SAR像经变换后，拉成列向量  $\mathbf{x}_k(n)$ ，则该类目标的数据矩阵可表示为

$$\mathbf{X}_k = [\mathbf{x}_k(1), \mathbf{x}_k(2), \dots, \mathbf{x}_k(N_k)] \quad (1)$$

由于训练样本的有限，通常，矩阵  $\mathbf{X}_k$  的行数远大于其列数，所以  $\mathbf{X}_k$  的秩小于  $N_k$ 。根据第  $k$  类目标的数据协方差矩阵

$$\hat{\mathbf{R}}_k = \mathbf{X}_k \cdot \mathbf{X}_k^H / N_k \quad (2)$$

的非零特征值所对应的特征矢量构成第  $k$  类目标数据的值空间  $\hat{\mathbf{S}}_k$ 。

基于SAR图像变换域进行特征提取的ATR方法大多是利用目标数据的值空间操作的。若实现对

不同类目标的有效分类与识别，就要求对应不同类目标的数据值空间彼此不相关，或相关性很弱。然而，常规军事目标在形态上、结构上存在较强的相似性，如图1所示。

利用这些目标的训练样本所构造的相应的值空间之间存在较大的相关性。例如：利用BMP与T72两类目标在  $0 \sim 60^\circ$  内的训练样本构造的值空间分别为  $\hat{\mathbf{S}}_{\text{BMP}}$  和  $\hat{\mathbf{S}}_{\text{T72}}$ ，对二者进行相关处理

$$\mathbf{C}_{\text{BT}} = \hat{\mathbf{S}}_{\text{BMP}}^H \hat{\mathbf{S}}_{\text{T72}} \quad (3)$$

将矩阵  $\mathbf{C}_{\text{BT}}$  的前20行与20列数据绘于图2中。显然，值空间  $\hat{\mathbf{S}}_{\text{BMP}}$  和  $\hat{\mathbf{S}}_{\text{T72}}$  并不正交，且二者部分子空间存在较强的相关性。

将BMP与T72两类目标在  $0 \sim 60^\circ$  内的测试样本分别向值空间  $\hat{\mathbf{S}}_{\text{BMP}}$  和  $\hat{\mathbf{S}}_{\text{T72}}$  投影，将投影矢量范数作为样本坐标绘于图3中。由图3可见，任何一类目标在两个值空间上的投影矢量范数之间具有较强的线性关系，不易于以此做为分类判据。另外，两类目标在图3中混迭在一起，导致可分度变差。

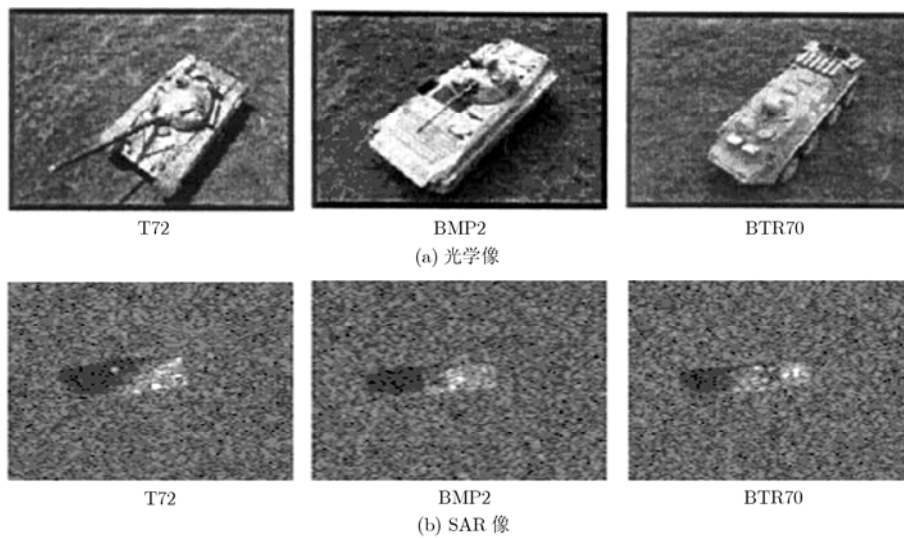


图1 几类军事目标的光学像和SAR像

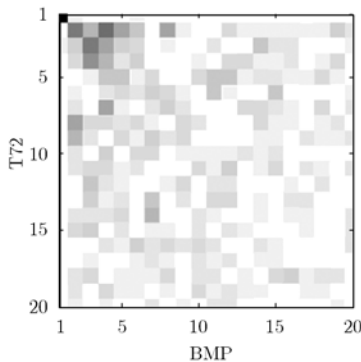


图2 两类军事目标训练样本的值空间的相关性

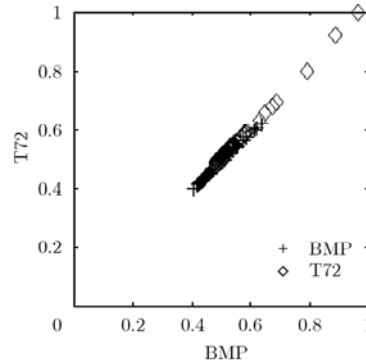


图3 两类目标测试样本在投影空间的投影矢量范数的分布

利用目标值空间构造的不同类别目标的特征模板之间可分度较差,影响ATR性能。因此,需要探索具有高可分度的特征模板构造方法。

### 3 本文提出的方法

用  $K$  类目标的全部训练样本构成目标数据矩阵

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_K] \quad (4)$$

与单独某类目标类似,通过对数据矩阵  $\mathbf{X}$  的协方差矩阵分解获得相应的值空间  $\hat{\mathbf{S}}$ 。显然,第  $k$  类目标的值空间  $\hat{\mathbf{S}}_k$  是  $\hat{\mathbf{S}}$  的子空间。令

$$\hat{\mathbf{G}}_k = \hat{\mathbf{S}}_k^\perp \cap \hat{\mathbf{S}} \quad (5)$$

式中  $\hat{\mathbf{S}}_k^\perp$  为  $\hat{\mathbf{S}}_k$  的正交补空间。易知,子空间  $\hat{\mathbf{G}}_k$  满足

$$\hat{\mathbf{S}} = \hat{\mathbf{S}}_k \cup \hat{\mathbf{G}}_k \quad (6)$$

因此,

$$\hat{\mathbf{G}}_k \hat{\mathbf{G}}_k^H = \hat{\mathbf{S}} \hat{\mathbf{S}}^H - \hat{\mathbf{S}}_k \hat{\mathbf{S}}_k^H \quad (7)$$

所以  $\hat{\mathbf{G}}_k$  为矩阵  $(\hat{\mathbf{S}} \hat{\mathbf{S}}^H - \hat{\mathbf{S}}_k \hat{\mathbf{S}}_k^H)$  的非零特征值对应的特征向量构成。

显然,全部数据的值空间  $\hat{\mathbf{S}}$  被分解为子空间  $\hat{\mathbf{S}}_k$  和  $\hat{\mathbf{G}}_k$ 。在理想条件下,第  $k$  类目标的全部信息即包含在子空间  $\hat{\mathbf{S}}_k$  中,在子空间  $\hat{\mathbf{G}}_k$  中不存在任何信息;而对于非第  $k$  类目标,其信息既存在于子空间  $\hat{\mathbf{S}}_k$  中,也存在于子空间  $\hat{\mathbf{G}}_k$  中。因此,利用测试样本在子空间  $\hat{\mathbf{G}}_k$  的投影不同来实现对目标的识别。

### 4 实验结果

本部分实验数据采用美国MSTAR计划获取的地面静止目标SAR图像数据,选取其中3大类目标BMP, BTR和T72的训练样本和测试样本。图像样本大小均为128×128,每类目标均包含着全方位样本数据。训练样本选择为下视角17°采集的数据,测试样本选择下视角15°时采集的数据。

首先,利用MSTAR数据研究本文方法所构造的特征模板的可分性。对于第  $l$  类目标的某测试样本  $\mathbf{x}_l(n)$  在第  $k$  类目标的子空间  $\hat{\mathbf{G}}_k$  上投影矢量范数的倒数可表示为

$$P_k(n) = \frac{1}{\|\hat{\mathbf{G}}_k^H \cdot \mathbf{x}_l(n)\|^2} = \frac{1}{\mathbf{x}_l^H(n) \cdot \hat{\mathbf{G}}_k \cdot \hat{\mathbf{G}}_k^H \cdot \mathbf{x}_l(n)} \\ = \frac{1}{\mathbf{x}_l^H(n) \cdot (\hat{\mathbf{S}} \hat{\mathbf{S}}^H - \hat{\mathbf{S}}_k \hat{\mathbf{S}}_k^H) \cdot \mathbf{x}_l(n)} \quad (8)$$

现利用 BMP 与 T72 两类目标在  $0 \sim 60^\circ$  内的训练样本构造相应的子空间  $\hat{\mathbf{G}}_{\text{BMP}}$  和  $\hat{\mathbf{G}}_{\text{T72}}$ , 并将此范围内的 3 大类目标 BMP, BTR 和 T72 的测试样本向这两个子空间投影,求得相应的  $P_{\text{BMP}}$  和  $P_{\text{T72}}$ , 并以  $(P_{\text{BMP}}, P_{\text{T72}})$  为坐标绘出各测试样本的分布情况, 如

图 4 所示。由图 4 可见,采用本文提出的方法构造投影空间可导致各类目标之间的差异性增大,有利于对目标进行有效地识别。

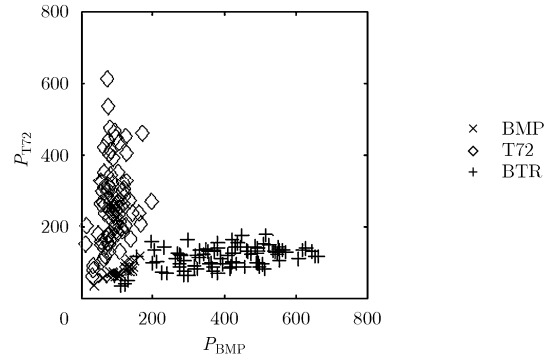


图 4 在新投影空间下几类目标测试样本的分布情况

下面,将本文方法与其它同类方法进行简单地比较。仍采用3大类目标,假设每类目标构造  $N$  个模板,则每个模板所用的数据存在于窗宽为  $\theta = 360^\circ / N$  的方位范围内。考虑在不同尺度方位窗下的识别方法SVM<sup>[15]</sup>, PCA<sup>[10]</sup>, KPCA<sup>[10]</sup>, Adaboost.M1<sup>[16]</sup>及本文方法对目标的总体识别率,如图5所示。显然,本文方法的识别性能明显地优于其它同类方法,仅在采用  $360^\circ$  模板时,略逊于Adaboost.M1方法。

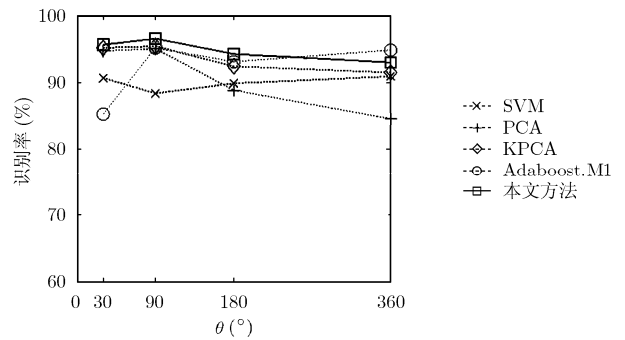


图5 几种方法的目标识别率比较

最后,研究本文提出的方法在采用不同方位窗内样本形成模板时,对SAR目标识别性能的影响。目标识别率随方位窗宽  $\theta$  的变化如图6所示。由图6可见,目标的识别率随着  $\theta$  的增大表现出一定的波动性,但整体识别率保持平稳。目标BMP与T72的识别率波动较大,这主要是由于在这两类目标的测试数据中存在新的子类目标。在图6中,BMP的总体识别率相对较低,这是由于该类目标的SAR像质量明显劣于其它两类目标。

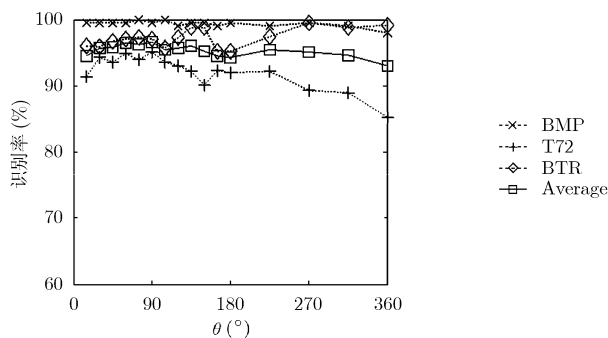


图6 目标识别率随方位窗宽的变化

## 5 结论

本文提出一种基于子空间的 SAR 目标识别方法, 该方法为解决不同类目标在样本值空间存在较强相关性问题, 利用样本正交补空间形成特征模板。采用本文方法构造的模板间具有较强的可分性, 并对方位窗尺度大小不敏感, 因此, 本文方法的识别性能明显优于其它同类方法。

## 参考文献

- [1] Sun Yi-jun, Liu Zhi-peng, and Todorovic Sinisa, *et al.* Synthetic aperture radar automatic target recognition using adaptive boosting. SPIE The International Society for Optical Engineering, San Diego, 2005, 5: 282-293.
- [2] Yang Yi-nan, Qiu Yu-xia, and Lu Chao. Automatic target classification experiments on the MSTAR SAR images. Proceedings of Sixth International Conference on SNPD/SAWN, Towson, 2005: 2-7.
- [3] Duan Rong, Chen Ling, and Man Hong. Adaptive SAR ATR in likelihood space. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XII, Proceedings of SPIE 2005, 5808: 294-305.
- [4] Wissinger J, Washburn R, and Morgon D, *et al.* Search algorithms for model-based SAR ATR. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery III, Proceedings of SPIE 1996, Orlando, FL, 1996, 2757: 279-293.
- [5] Novak L M, Owirka G J, and Brower W S, *et al.* The automatic target recognition system in SAIP. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1997, 10(2): 185-202.
- [6] Potter L C and Moses R L. Attributed scattering centers for SAR ATR. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(1): 79-91.
- [7] 高贵, 计科峰, 匡纲要, 等. 高分辨率 SAR 图像目标峰值提取及峰值稳定性分析. *宇航学报*, 2004, 25(1): 102-108.  
Gao Gui, Ji Ke-feng, and Kuang Gang-yao, *et al.* Target's peak extraction from high-resolution SAR image and peak's stability analysis. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 25(1): 102-108.
- [8] 胡利平, 刘宏伟, 吴顺君. 一种新的 SAR 图像目标识别预处理方法. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 5(34): 733-737.

- [9] Hu Li-ping, Liu Hong-wei, and Wu Shun-jun. Novel pre-processing method for SAR image based automatic target recognition. *Journal of Xidian University*, 2007, 5(34): 733-737.
  - [9] 何壺, 刘宏伟, 吴顺君. 基于 MSTAR 数据的 SAR 图像自动目标识别. 2005 年中国合成孔径雷达会议, 南京, 2005: 278-282.
  - [10] He Kun, Liu Hong-wei, and Wu Shun-jun. Automatic target recognition based on MSTAR SAR image database. Proceedings of CSAR-2005, Nanjing, 2005: 412-417.
  - [10] 韩萍, 吴仁彪, 王兆华, 等. 基于 KPCA 准则的 SAR 目标特征提取与识别. *电子与信息学报*, 2003, 25(10): 1297-1301.
  - [11] Han Ping, Wu Ren-biao, and Wang Zhao-hua, *et al.* SAR automatic target recognition based on KPCA criterion[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(10): 1297-1301.
  - [11] Han Ping, Wu Ren-biao, and Wang Yun-hong, *et al.* An efficient SAR ATR approach. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Hong Kong, China, 2003, 4: 429-432.
  - [12] 王世晔, 贺志国. 基于 PCA 特征的快速 SAR 图像目标识别方法. *国防科技大学学报*, 2008, 30(3): 137-141.
  - [12] Wang Shi-xi and He Zhi-guo. The fast target recognition approach based on PCA features for SAR images. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(3): 137-141.
  - [13] 宦若虹, 杨汝良. 基于 KFD+ICA 特征提取的 SAR 图像目标识别. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(7): 1237-1240.
  - [13] Huan Ruo-hong and Yang Ru-liang. SAR image target recognition based on KFD + ICA feature extraction. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(7): 1237-1240.
  - [14] Hu Li-ping, Liu Jin, and Liu Hong-wei, *et al.* Automatic target recognition based on SAR images and two-stage 2DPCA features. The Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan, 2007, 11: 801-805.
  - [15] Zhao Qun and Principe J C. Support vector machine for SAR automatic target recognition. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(2): 643-654.
  - [16] 王颖. 基于 Boosting 的 SAR 自动目标识别技术研究. [硕士论文], 中国民航大学, 2007.
  - [16] Wang Ying. Research on SAR ATR based on boosting. [Master dissertation], Civil Aviation University of China, 2007.
- 韩 征: 女, 1984 年生, 硕士生, 研究方向为模式识别。  
苏志刚: 男, 1972 年生, 教授, 研究方向为阵列信号处理、雷达信号处理、谱估计等。  
韩 萍: 女, 1966 年生, 教授, 研究方向为图像处理与模式识别。  
吴仁彪: 男, 1966 年生, 教授, 研究方向为自适应信号处理及其应用。