

文章编号: 1672-2892(2011)02-0133-05

基于一维匹配滤波的 SAR 目标识别

陈 思, 杨 健

(清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 为克服合成孔径雷达(SAR)目标位置和姿态不确定性对识别性能的影响, 提出了一种基于一维匹配滤波的 SAR 目标识别方法。基于姿态估计对目标图像进行预处理, 基于一维匹配滤波定义两样本图像间的相似度或距离, 并采用最近邻分类器。在 MSTAR 公开数据集上进行了实验, 已知和未知目标姿态情况下的识别率分别达到 98.8% 和 98.2%。实验结果表明, 所提出的方法性能优于支持向量机(SVM)方法。

关键词: 合成孔径雷达; 目标识别; 匹配滤波; 图像预处理; 最近邻分类器

中图分类号: TN959.1⁺7

文献标识码: A

SAR target recognition based on one dimensional matched filtering

CHEN Si, YANG Jian

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to overcome the effects on the recognition performances caused by position and pose uncertainty of Synthetic Aperture Radar(SAR) targets, a new method for SAR target recognition was proposed based on one dimensional matched filtering. The target image was pre-processed based on the pose estimation, the similarity or distance between two sample images was defined based on the one dimensional matched filtering, and the nearest neighbor classifier was used. Experiments were conducted on the MSTAR public data set, and the recognition rates with and without knowledge of the target pose achieved 98.8% and 98.2% respectively. According to the experiment results, the proposed method outperforms the Support Vector Machine(SVM) method.

Key words: Synthetic Aperture Radar; target recognition; matched filtering; image pre-processing; nearest neighbor classifier

SAR 是一种先进的遥感设备^[1-2], 具有全天时、全天候工作能力以及防区外探测能力, 因此在军事侦察中被广泛应用。基于 SAR 图像的自动目标识别(Automatic Target Recognition, ATR)具有重要的实用价值^[3]。

完整的 SAR ATR 系统一般包括目标的检测、辨识和识别等阶段, 目标识别阶段的输入为前端输出的包含目标的感兴趣区域(Region of Interest, ROI)图像切片。识别方法主要分为基于模板的和基于模型的两类^[4-5]。其中基于模型的方法对于不同的工作条件具有更好的适应性, 但是实现比较复杂, 计算效率偏低; 而基于模板的方法实现简单, 速度快, 因此目前在实用中被更多地采用。利用相关滤波器进行识别本质上属于基于模板的方法, 由于采用了滤波器的实现形式而具有性能和效率上的独特优势^[6-7]。滤波器法通常在图像的二维频域实现, 对目标的二维位置平移不敏感, 但对目标的姿态变化即旋转比较敏感。文献[8]提出了一种快速稳健的 SAR 目标姿态估计方法, 借助该方法的中间结果可以在不额外增加计算量的前提下获得目标的位置信息。本文据此提出一种对目标图像进行旋转和平移归一化预处理, 进而通过匹配滤波进行识别的方法, 将滤波器简化为在图像的一维频域实现, 采用简单的最近邻准则分类, 并与经典的 SVM 分类器进行对比。

1 图像预处理

图像预处理是为了将原始的 ROI 图像切片转化为适合于直接进行特征度量计算的标准化样本图像, 尽可能消

除或减少目标姿态及位置不确定性,压缩特征维度和搜索空间。目前广泛采用的预处理方法主要是选定目标中心并截取一定范围内的图像,其中目标中心一般选取 ROI 图像切片的中心点、最亮点、质心点等,截取范围一般为目标中心周围固定边长的正方形,隐含的前提假设为目标大体上位于 ROI 的中心并且有一定的尺寸上限。这些前提假设在实际应用中是合理的,但以中心点、最亮点、质心点作为目标中心并不准确,在预处理后的图像中目标位置仍然存在二维不确定性;目标的长宽尺寸上限通常有较大差别,用固定边长的正方形进行分离没有充分利用目标的形状特性。此外,一些研究中认为目标姿态已知,或首先采用各种方法估计目标姿态,进而在预处理中对图像进行旋转以实现目标姿态归一化,对提高识别性能有较大帮助,但实际应用中目标姿态通常是未知的,姿态估计方法的效率和可靠性对 ATR 系统整体有直接影响。

本文以文献[8]提出的快速稳健的 SAR 目标姿态估计方法为基础,借助其过程中获得的目标法向前边界和质心位置,采用长宽不等的矩形分离目标。预处理方法如下:

1) 确定目标姿态。对于未知姿态的目标,采用文献[8]的方法估计目标姿态。

2) 确定目标法向前边界。在估计目标姿态的过程中得到了对应各个方向的目标前边界,其中与最终估计的目标姿态 $\hat{\theta}$ 对应的即为真实的目标法向前边界 $\hat{r}$ 。由文献[8]的式(7)和式(8),有:

$$\hat{r} = \arg \max_{r \in [r_1(\hat{\theta}), r_2(\hat{\theta})-1]} (h_s(r+1, \hat{\theta}) - h_s(r, \hat{\theta})) \quad (1)$$

式中: $h_s(r, \hat{\theta})$ 为强散射点法向分布; $[r_1(\hat{\theta}), r_2(\hat{\theta})]$ 为 $h_s(r, \hat{\theta})$ 前部高差最大的单调上升区间^[8]。

在某些情况下,目标姿态是已知的,此时仍然可以通过相似的过程由式(1)确定法向前边界,只是估计的目标姿态 $\hat{\theta}$ 由已知的目标姿态 θ 取代。

3) 旋转并截取。以文献[8]二值化过程中得到的质心点在目标法向前边界上的投影为中心,对原始的 ROI 图像切片进行旋转,使得目标主轴向与图像列方向一致。根据所关注目标的最大尺寸和图像分辨率,对旋转后的图像进行截取:垂直于目标主轴向,从目标法向前边界开始,在包含目标一侧截取固定距离,沿目标主轴向从旋转中心向两侧对称截取固定距离,得到矩形目标区,为保证目标无缺失,再将矩形边界向四周扩展固定距离。旋转并截取后的图像称为标准化目标图像,目标姿态已经归一化,目标垂直于主轴向的位置由法向前边界完全确定并对准,不过由质心点估计的目标沿主轴向的位置仍存在一定的误差,即目标位置仍存在沿主轴向的一维不确定性。

4) 取对数。对标准化目标图像取对数,将乘性噪声转化为加性噪声,得到标准化目标对数图像。

5) 降采样。为进一步压缩特征维度和搜索空间,提高识别效率,可以对标准化目标对数图像再进行降采样,适当降低分辨率。目标在不同的分辨率下可能表现出不同的性质,因此所采用的分辨率不同,识别性能也会有所不同。

2 匹配滤波分类器

记两样本标准化目标对数图像分别为 $p_1(r, c)$ 和 $p_2(r, c)$, $1 \leq r \leq M, 1 \leq c \leq N$, 由于目标垂直于主轴向的位置已经完全确定并对准,只需要沿目标主轴向计算二者的循环相关,即:

$$r_{1,2}(s) = \frac{\sum_{r=1}^M \sum_{c=1}^N p_1'(r+s, c) p_2(r, c)}{\sqrt{\sum_{r=1}^M \sum_{c=1}^N p_1^2(r, c)} \sqrt{\sum_{r=1}^M \sum_{c=1}^N p_2^2(r, c)}}, s = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

式中:

$$p_1'(r, c) = p_1(((r-1) \bmod M) + 1, c), r \geq 1 \quad (3)$$

为 $p_1(r, c)$ 的周期延拓。循环相关等价于匹配滤波,即:

$$r_{1,2}(s) = \frac{\sum_{c=1}^N \left(\frac{1}{M} \sum_{u=1}^M P_1(u, c) P_2^*(u, c) \exp\left(\frac{j2\pi us}{M}\right) \right)}{\sqrt{\sum_{r=1}^M \sum_{c=1}^N p_1^2(r, c)} \sqrt{\sum_{r=1}^M \sum_{c=1}^N p_2^2(r, c)}} \quad (4)$$

$$P_k(u, c) = \sum_{r=1}^M p_k(r, c) \exp(-\frac{j2\pi ur}{M}), k=1, 2 \quad (5)$$

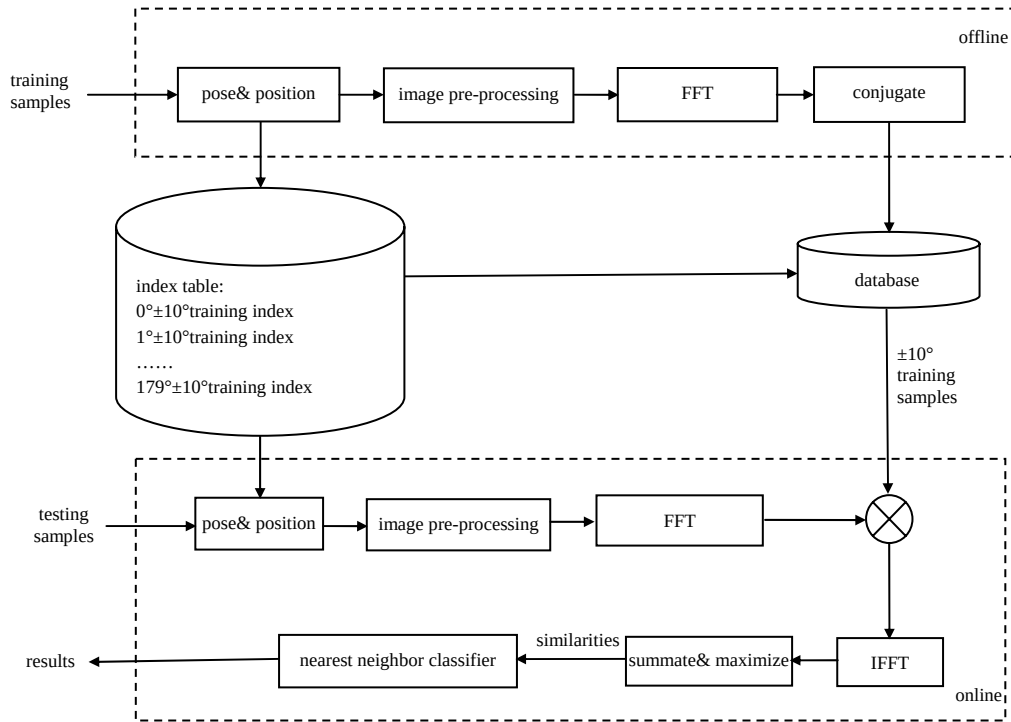


Fig.1 Diagram of the matched filtering classifier

图 1 匹配滤波分类器框图

相关峰

$$r_{1,2}^{\dagger} = \max_{1 \leq s \leq M} r_{1,2}(s) \in [0, 1] \quad (6)$$

代表两样本之间的相似度, 可将 $(1-r_{1,2}^{\dagger}) \in [0, 1]$ 视为两样本之间的距离度量, 并采用简单的最近邻分类器, 即分别求得待识别样本与各已知样本之间的相似度, 判定待识别样本跟与之相似度最高的已知样本属于同一类别。已知(训练)样本集一般包含目标在不同姿态下的图像, 由于预处理阶段已获得了待识别(测试)样本的目标姿态, 应只选择目标姿态与测试样本接近的训练样本参与相似度计算和比较, 这样既保证了图像相关性, 又减少了模板数量, 从而有利于提高目标识别的效率和效果。训练样本的选择可以通过预先分组来实现, 考虑到目标姿态估计的准确度和稳定性, 将训练集划分为有重叠的 180 组, 各组分别包含目标姿态角在以 $0^{\circ}, 1^{\circ}, \dots, 179^{\circ}$ 为中心 $\pm 10^{\circ}$ 范围内的所有训练样本, 建立对应的索引表, 对于每个测试样本, 根据其目标姿态选择相应组。图 1 为分类器框图。

3 实验结果与分析

利用运动和静止目标获取与识别(Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition, MSTAR)公开数据集中 BMP2, BTR70, T72 三类目标数据对方法进行验证, 按照 MSTAR 项目组的推荐配置, 训练集选用三类目标各一个序列号在 17° 俯视角下的图像, 测试集选用三类目标共 7 个序列号在 15° 俯视角下的图像, 具体如表 1。图 2 为采用本文预处理方法获得的标准化目标对数图像(三类目标各选取了一幅作为代表), 截取范围为垂直于目标主轴向 20 像素(单向)、沿目标主轴向 34 像素(对称)、四周扩展 2 像素, 因此标准化目标对数图像(原始分辨率)尺寸为 72×24 像素。

为分析识别性能与图像分辨率的关系, 表 2 和表 3 中列出了预处理后采用不同图像尺寸的情况下匹配滤波分类器的识别正确率。

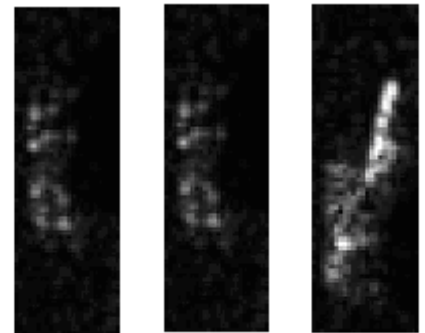


Fig.2 Standard target logarithm images(from left to right: BMP2, BTR70, T72)

图 2 标准化目标对数图像(自左至右: BMP2, BTR70, T72)

MSTAR 数据包含目标姿态信息, 在实验中训练样本的目标姿态应视为已知, 表 2 中将测试样本的目标姿态也视为已知, 与有关文献中的结果进行对比, 表 3 中采用文献[8]的方法估计测试样本的目标姿态, 以体现姿态估计误差对识别性能的影响。表 4 和表 5 为与最高识别率相对应的混淆矩阵。

表 1 MSTAR 三类目标识别实验训练集和测试集

Table1 Training & testing sets of the MSTAR 3-class target recognition experiments			
training sets		testing sets	
target No.	samples	target No.	samples
BMP2-C21	233	BMP2-C21	196
		BMP2-9563	195
		BMP2-9566	196
BTR70-C71	233	BTR70-C71	196
T72-132	232	T72-132	196
		T72-812	195
		T72-S7	191

由表 2 和表 3 中识别正确率随图像尺寸的变化趋势可以看出图像分辨率对识别性能的影响。由于目标垂直于主轴向的位置已经完全确定并对准, 无须在该方向上搜索相关峰, 适当降低该方向的分辨率既保持了关于目标散射特性的主要信息, 又平滑了可能造成干扰的细节和噪声, 识别性能不会明显恶化, 反而可能有所改善。相比之下, 识别正确率受轴向分辨率降低的影响大于受垂向分辨率降低的影响, 这是由于目标沿主轴向的位置不能完全确定, 而是在一个较小的范围内变化, 匹配滤波就是沿目标主轴向搜索相关峰, 降低该方向的分辨率会降低对准准确度, 从而降低识别性能。

表 2 匹配滤波分类器已知目标姿态识别正确率(%)

Table2 Correct recognition rate of the matched filtering classifier with knowledge of pose(%)

		normal size/pixel				
		24	12	8	6	4
tangential size/pixel	72	98.7	98.8	98.5	98.7	98.0
	36	98.3	98.5	98.2	98.4	97.9
	24	98.1	98.5	98.2	97.7	97.0
	18	97.5	97.7	97.3	97.0	95.9
	12	96.7	96.6	96.2	95.8	95.4

表 3 匹配滤波分类器未知目标姿态识别正确率(%)

Table3 Correct recognition rate of the matched filtering classifier without knowledge of pose(%)

		normal size/pixel				
		24	12	8	6	4
tangential size/pixel	72	97.4	97.7	98.2	97.9	97.9
	36	96.8	97.3	97.7	97.5	97.5
	24	96.6	97.2	97.5	97.2	96.6
	18	95.9	96.2	96.6	96.4	96.0
	12	93.9	93.8	94.4	94.5	94.2

由表 2 和表 3、表 4 和表 5 的对比可见目标姿态估计的误差对识别正确率有一定的影响, 由于所采用的姿态估计方法具有良好的稳健性, 这种影响并不严重, 仅导致一两个百分点的下降。值得注意的是识别正确率的最高值所对应的垂直于目标主轴向的图像尺寸, 表 2 中为初始的 1/2, 而表 3 中为初始的 1/3, 这说明垂向分辨率的适当降低对目标姿态估计误差造成的影响有一定补偿作用。

表 4 已知姿态下最高识别率对应的混淆矩阵

Table4 Confusion matrix corresponding to the highest recognition rate with knowledge of pose

target No.	BMP2	BTR70	T72
BMP2-C21	196	0	0
BMP2-9563	195	0	0
BMP2-9566	188	3	5
BTR70-C71	0	196	0
T72-132	0	0	196
T72-812	7	0	188
T72-S7	1	0	190

表 5 未知姿态下最高识别率对应的混淆矩阵

Table5 Confusion matrix corresponding to the highest recognition rate without knowledge of pose

target No.	BMP2	BTR70	T72
BMP2-C21	196	0	0
BMP2-9563	194	1	0
BMP2-9566	193	2	1
BTR70-C71	1	195	0
T72-132	2	1	193
T72-812	13	1	181
T72-S7	3	0	188

文献[3]给出了同一实验数据集上 SVM 分类器的识别性能, 已知目标姿态下最高识别正确率为 96.7%。为便于对比, 采用相同的 SVM 分类器, 同时采用本文的图像预处理方法进行实验, 已知目标姿态下最高识别正确率为 97.0%。匹配滤波分类器这一指标为 98.8%, 即使在未知目标姿态下也达到了 98.2%, 明显优于 SVM 分类器。

表 6 列出了采用本文的图像预处理方法后分别基于一维和二维匹配滤波器进行分类的正确识别率以及处理单个样本的平均时间。

由表 6 可见,二维匹配滤波分类器的正确识别率略高于一维匹配滤波分类器,而后的平均处理时间明显少于前者。

表 6 一维与二维匹配滤波分类器性能比较
Table6 Comparisons between performances of one dimensional and two dimensional matched filtering classifiers

	with knowledge of pose		without knowledge of pose	
	correct recognition rate	average processing time	correct recognition rate	average processing time
two dimensional matched filtering	99.1%	42 ms	98.4%	32 ms
one dimensional matched filtering	98.8%	17 ms	98.2%	14 ms

由于采用了本文的图像预处理方法,可以准确地获得目标姿态及法向前边界位置信息,消除目标方向及一维位置不确定性,因而不必再垂直于目标主轴向进行搜索。用沿目标主轴向的一维匹配滤波代替二维匹配滤波,正确识别率仅降低 0.2 至 0.3 个百分点,实际上没有本质差别,而二维 FFT 运算简化为一维 FFT 运算,则使得计算时间节省了一半以上。

4 结 论

本文提出了一种新的 SAR 目标识别方法,基于姿态估计对目标图像进行旋转和平移归一化预处理,获得了仅存在一维位置不确定性的标准化目标图像,进而利用一维匹配滤波搜索相关峰,定义两样本图像间的相似度或距离,并采用简单的最近邻准则分类。在 MSTAR 数据集上进行的实验表明,本文提出的目标识别方法具有良好的性能,优于同样实验条件下的 SVM 分类器。

参考文献:

[1] 杨蒿,蔡竟业. 线性调频连续波合成孔径雷达成像算法[J]. 信息与电子工程, 2008,6(3):167-171. (YANG Hao,Cai Jingye. Linear Frequency Modulated Continuous Wave-Synthetic Aperture Radar Imaging Algorithm[J]. Information and Electronic Engineering, 2008,6(3):167-171.)

[2] 林华. 无人机载太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):373-377. (LIN Hua. Analysis and Simulation of UAV Terahertz Wave Synthetic Aperture Radar Imaging[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(4):373-377.)

[3] 宦若虹. 合成孔径雷达图像目标识别方法研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所, 2008. (HUAN Ruohong. Study on Method for Synthetic Aperture Radar Image Target Recognition[D]. Beijing:Institute of Electronics,Chinese Academy of Sciences, 2008.)

[4] Novak L M,Owirka G J,Brower W S. Performance of 10- and 20-target MSE classifiers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000,36(4):1279-1289.

[5] DeVore M D,O'Sullivan J A. Quantitative statistical assessment of conditional models for synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004,13(2):113-125.

[6] Enderli C,Savy L,Refregier P. Application of the deflection criterion to classification of radar SAR images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007,29(9):1668-1672.

[7] 潘卓,高鑫,王岩飞,等. SAR 场景图像中车辆目标的自动识别[J]. 系统工程与电子技术, 2009,31(7):1596-1601. (PAN Zhuo,GAO Xin,WANG Yanfei,et al. Automatic Vehicle Target Recognition in Full SAR Image Scenes[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009,31(7):1596-1601.)

[8] Chen Si,Yang Jian,Song Xiaoquan. A New Method for Target Aspect Estimation in SAR Images[C]// Proc. The International Conference on Multimedia Technology. Ningbo:[s.n.], 2010:1060-1063.

作者简介:



陈 思(1983-),男,辽宁省锦州市人,在读博士研究生,主要研究方向为雷达图像处理与目标识别,email:chensai@mails.thu.edu.cn.

杨 健(1965-),男,湖北省襄樊市人,清华大学电子工程系教授,博士生导师,IEEE 高级会员,IEICE 中国分会主席,IEEE AES 中国分会副主席,主要研究领域为极化雷达遥感。