

基于图像序列的地面慢动多目标识别与跟踪

汪洪桥¹ 蔡艳宁² 付光远¹ 伍明¹ 王仕成³

¹第二炮兵工程大学信息工程系, 陕西 西安 710025

²第二炮兵工程大学理学院, 陕西 西安 710025

³第二炮兵工程大学控制工程系, 陕西 西安 710025

摘要 基于大场景合成孔径雷达(SAR)图像序列,研究了一种针对多类慢动车辆目标的识别与跟踪方法,采用先识别、再跟踪的思路。提出了一种图像目标局部多分辨分析与多核分类器相结合的识别方法,实现了多类目标的快速特征提取和准确分类。根据相邻帧之间目标的对应关系,利用无偏卡尔曼滤波对目标的运动参数进行估计,并用实际测量值不断进行修正,实时获取目标的坐标、类型等信息,实现了复杂背景下地面多类慢动目标的高效跟踪。通过构建大场景合成孔径雷达序列图像进行仿真实验,证实了该方法具有快速和稳定的收敛性能,实时性较好,具有较高的跟踪精度。

关键词 机器视觉;目标识别与跟踪;多分辨分析;多尺度核分类器;图像序列;无损卡尔曼滤波

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.051501

Recognition and Tracking of Multiple Slowly-Moving Ground Targets Based on Image Series

Wang Hongqiao¹ Cai Yanning² Fu Guangyuan¹ Wu Ming¹ Wang Shicheng³

¹Department of Information Engineering, The Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China

²College of Science, The Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China

³Department of Control Engineering, The Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract Based on the large-scale scene synthetic aperture radar (SAR) image series, a combined recognition and tracking method for various slowly-moving vehicle targets is presented. The method introduces an idea named recognition first and tracking later. A recognition algorithm combining local multi-resolution analysis for image target and multiple kernel classifier is studied, which realizes the high-speed feature extraction and accurate classification of various image targets. According to the corresponding relationship of targets in the adjacent frames, the targets' motion parameters are estimated utilizing the unscented Kalman filter. Simultaneously, the real-time location and target type can be obtained via continuous correction using the measured values; as a result, high performance tracking of various slowly-moving ground targets in complicated background is realized. Large-scale scene SAR series images are constructed and several simulation tests are performed, demonstrating that the method has good convergence, excellent real-time performance, and high tracking precision.

Key words machine vision; target recognition and tracking; multi-resolution analysis; multi-scale kernel classifier; image series; unscented Kalman filter

OCIS codes 150.0155; 200.3050; 200.4260; 100.5010

收稿日期: 2015-11-30; 收到修改稿日期: 2015-12-07; 网络出版日期: 2016-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61202332, 61403397, 61503389)、中国博士后科学基金(2012M521905)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2015JM6313)

作者简介: 汪洪桥(1979—),男,博士,讲师,主要从事目标识别与跟踪、机器学习等方面的研究。

E-mail: ep_whq@163.com

1 引言

地面运动目标的检测、识别与跟踪是战场监视与侦察的重要内容。从技术手段来讲,基于成像的地面(包括海面)运动目标跟踪主要包括光电、红外和雷达三类。光电精确制导武器在末制导阶段,导引头在高动态环境下对目标的持续稳定跟踪是这类武器的关键技术之一。典型的如基于模板匹配方法,利用先验知识,先训练进而实现对动态目标的跟踪^[1],也可采用基于视觉的方法^[2-4]锁定单个目标进行跟踪,但很难同时实现对较大场景多个目标的辨识。红外目标成像和跟踪也是提高精确制导武器打击精度和增强战场探测系统性能^[5-6]的主要方法。但这类系统成像很难精确刻画目标特征,远距离探测分辨率低,可辨识性不强,通常仅对单个目标实现跟踪,很难实现多类目标的判定。基于雷达系统的地面目标跟踪,一般用于机载雷达对地面慢动目标的探测^[7-10],实时给出处于雷达探测范围内地面目标的当前方位、幅度、与载机的相对距离等信息。这类系统技术成熟、跟踪效率较高,但均不对目标进行高分辨率成像,多是对点目标实现探测和跟踪,不对多个面目标或具有结构特征的目标进行辨识和跟踪。

通过分析可以看出,同时具有高分辨率成像和动目标指示能力是实现慢动目标探测和跟踪的重要途径,在这方面,合成孔径雷达(SAR)具有先天的优势。对于运动目标的机载 SAR 检测和跟踪,特别是很多文献中提及的慢动目标,可以简单从两个方面进行定义:1) 速度上,慢动目标是相对于雷达载机(100~300 m/s)的快速运动而言的,即一般地面运动目标,如各种轮式或履带式运动车辆,均属于慢动目标的范畴,但其他一些运动目标,如掠地飞行的巡航导弹不在此列;2) 频谱上,慢动目标是相对于静止目标而言的,普通机载雷达系统只考虑静止目标的聚焦,对于慢速运动目标,其回波信号落入主瓣杂波区,由于其运动参数与静止目标不同,在静止的雷达图像中通常表现为散焦或移位的信息。慢速运动目标与主杂波混叠在一起,不容易检测和定位。这些目标往往是军事上感兴趣的地面运动坦克、轮式或履带式车辆等军事目标,因此,对慢动目标的识别与跟踪非常重要。

在基于 SAR 的地面运动目标跟踪方面,早期的研究主要集中于海面上浮冰的运动跟踪,如 Kwok 等^[11]利用 SAR 图像序列分析了阿拉斯加海域冰山的运动,采用的是简单的基于特征和区域的跟踪算法。Daida 等^[12]提出了一类面向对象的特征跟踪技术。Strozzi 等^[13]提出了针对冰河的密度跟踪技术。Yang 等^[14]提出了自适应子空间滤波方法用于运动目标的跟踪。Kirubarajan 等^[15]针对地面运动目标的运动提出了基于交互式多模型滤波的跟踪方法,克服了传统卡尔曼滤波方法对于复杂运动难以跟踪的弱点。总的说来,目标跟踪方面的研究还较为初步。在利用 SAR 图像序列对地面目标跟踪方面,文献^[16]基于多视图像序列跟踪的 SAR 地面运动目标检测,利用具有方向性约束的动态规划实现动目标在 SAR 多视图像序列上的轨迹跟踪。该方法可改善微弱目标检测性能,但忽略了高分辨率 SAR 图像目标本身蕴含的信息,仍未对目标的大小、结构、方向及更深层的特征加以利用。

随着 SAR 成像分辨率和系统集成度的逐步提高,如何利用 SAR 对地面慢动目标成像,进而通过高分辨率图像序列,特别是充分利用目标特征信息,实现多类慢动目标的识别和跟踪将是重要的研究方向。本文立足大场景高分辨率 SAR 图像序列的仿真生成,采用先识别、再跟踪的思路,研究了一种局部多分辨分析与多核分类器相结合的识别方法,并结合无损卡尔曼滤波(UKF),实现地面多类慢动目标高性能分类与跟踪。主要工作重点在 SAR 的高分辨率成像后处理,也就是对高分辨率图像的处理,而不是从前端雷达信号处理的角度进行目标检测,主要考虑对地面车辆这类面目标的结构及更深层的特征加以利用,以便于目标的识别。因此,本文中慢动目标特指 SAR 高分辨率成像车辆目标,如坦克、轮式或履带式装甲车辆等目标。最后通过仿真实验,验证了算法的有效性。

2 地面目标高精度快速识别

要对大场景 SAR 图像中的目标进行跟踪,首先需对多类目标进行识别,才能对不同目标的运动趋势进行持续预测。对目标的识别需从两方面入手,一是针对图像目标特点,要有快速、低维数的特征提取方法,特别是对实时性要求较高的目标跟踪领域;二是要利用高效的分类器,实现目标的高精度识别。

2.1 局部多分辨率分析与特征提取

对于高分辨率 SAR 地面慢动目标的识别与跟踪,不失一般性,可将 SAR 图像自动目标识别(ATR)数据集 MSTAR 作为考察对象。MSTAR 切片中的目标具有以下特点:样本图像为等大小的切片形式;每个切片中仅包含一个目标;每个目标都位于切片的中心位置;目标绕中心旋转呈 360° 分布,分辨率相同,无比例变化。鉴于此,借鉴感受野模型的机理和尺度不变特征变换(SIFT)方法的特点,首先构建一种基于图像的多级类高斯函数差分(DOG)尺度空间,然后设计一组 8 邻域正交基,对图像进行多级采样滤波处理,获得图像在 8 个方向上的

$$\text{特征,以及一个低频滤波特征。8 邻域正交基结构单元为 } \mathbf{H}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} -0.5 & -0.5 & -0.5 \\ 1 & 1 & 1 \\ -0.5 & -0.5 & -0.5 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} -0.5 & 1 & -0.5 \\ -0.5 & 1 & -0.5 \\ -0.5 & 1 & -0.5 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ -0.5 & 1 & -0.5 \\ -0.5 & -0.5 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} -0.5 & -0.5 & 1 \\ -0.5 & 1 & -0.5 \\ 1 & -0.5 & -0.5 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_5 =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_7 = \begin{bmatrix} -0.5 & 1 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & -1 & 0.5 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_8 = \begin{bmatrix} -0.5 & 0 & 0.5 \\ 1 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \text{正交基矩阵为}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & \mathbf{H}_2 & \mathbf{H}_3 \\ \mathbf{H}_4 & \mathbf{H}_0 & \mathbf{H}_5 \\ \mathbf{H}_6 & \mathbf{H}_7 & \mathbf{H}_8 \end{bmatrix}。$$

借鉴传统小波方法的采样滤波思想,采用一种局部延展的采样方法,每次采样都从局部点向周围扩展,保证产生的基都正对局部区域,这样相同的局部特性在基上投影的系数相似,有利于特征的描述及目标的识别。

具体实现时,从图像局部点(可以是关注点或感兴趣点)出发,采用快速滤波器对图像进行多次滤波处理,即对图像多分辨率,得到原图像类 DOG 空间图像,直接利用各级图像中关键像素的采样,可以快速获取图像的局部多分辨率特征。

针对 MSTAR 库中的图像,先将目标进行恒虚警率(CFAR)检测,考虑每一幅图像切片中的目标只占据中央位置,为方便进行分级滤波处理,取每个 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 图像的中心 $81 \text{ pixel} \times 81 \text{ pixel}$ 大小区域作为研究对象。在此基础上,对获得的图像进行 4 级局部多分辨率。其中最顶层为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 大小,直接取 9 维特征;第 2 层取顶层外围 8 个像素对应的 8 个 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 大小块,取 72 维特征;第 3 层类似于第 2 层,取上层各块中心对应的 8 个 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 大小块,取 72 维特征;第 4 层直接取外围的 8 个中心点,为 8 维特征。因此,对应一幅图像,总的特征维数为 $9+72+72+8=161$ 维。

2.2 多核分类器设计

多核学习^[17-20]的一种特殊情形就是将多个尺度的核进行融合。这种方法更具灵活性,并且能够提供比合成核方法更完备的尺度选择。此外,随着小波理论、多尺度分析理论的不断成熟与完善,多尺度核方法通过引入尺度空间具有了很好的理论背景。

多尺度核方法的基础是找到一组具有多尺度表示能力的核函数。在广泛使用的核函数中,高斯径向基核最受欢迎,因为它们具有通用普遍的近似能力,同时也是一种典型的可多尺度化核,

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{z}\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中 K 为核函数, \mathbf{x}, \mathbf{z} 为两个维数相同的向量, σ 为尺度参数。以此核为例,将其多尺度化(假设其具有平移不变性)为

$$K\left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{z}\|^2}{2\sigma_1^2}\right), \dots, K\left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{z}\|^2}{2\sigma_m^2}\right), \quad (2)$$

式中 $\sigma_1 < \dots < \sigma_m$, 可以看出,当 σ 较小时,支持向量分类器(SVC)可以对那些变化剧烈的样本进行分类,而当 σ 较大时,可以对那些变化平缓的样本进行分类,得到更优的泛化能力。具体实现时, σ 的取值可以借鉴小波变换中尺度变化的规律, σ 可定义为

$$\sigma_i = 2^i \sigma, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

利用多尺度核融合得到的核矩阵,代替常规支持向量机(SVM)的简单核矩阵,可以将特征的辨别力大幅提升,提高分类准确率。对于一个两类分类问题,简单核学习的决策函数为

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \langle \phi(\mathbf{x}), \phi(\mathbf{x}_i) \rangle + b \right], \quad (4)$$

代入核函数,其形式变换为

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + b \right], \quad (5)$$

式中 α_i 为拉格朗日乘子, y_i 为类别符号, ϕ 为映射函数, b 为偏差项。对于典型多核函数凸组合的多核学习方法,其决策函数为

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left[\sum_{j=1}^m \beta_j \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \langle \phi_j(\mathbf{x}), \phi_j(\mathbf{x}_i) \rangle + b \right], \quad (6)$$

即

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left[\sum_{j=1}^m \beta_j \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K_j(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + b \right], \quad (7)$$

式中 β_j 为多核函数的加权系数。

另一方面,将具有多分辨特性的特征与多个尺度核函数的核机器进行融合,也是提高目标识别正确率的有效途径。采用4级多分辨分解结合4尺度高斯核方法,对应的核函数尺度会翻一番。同时,确定核函数加权系数时,加权求和采用等系数平均,即 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 1/4$ 。

整个目标识别过程包括离线训练和在线识别两个阶段,如图1所示。离线训练主要基于MSTAR数据集,首先对大量目标切片进行CFAR检测,实现目标分割;然后从每幅切片的中心(也即目标中心)出发,对目标进行4级多分辨分解,提取出每个目标的特征向量;利用这些多级特征向量(也即样本),可训练出多核分类器。在线识别立足于实时获取的大场景序列图像样本,首先对每一帧大场景图像进行CFAR检测,分割出目标;然后对每一个目标求取重心,从重心点出发,在原图像中对目标进行局部4级多分辨分解,提取每个目标的特征向量;将这些实时获取的特征向量送入多核分类器,即可得到目标的识别结果。

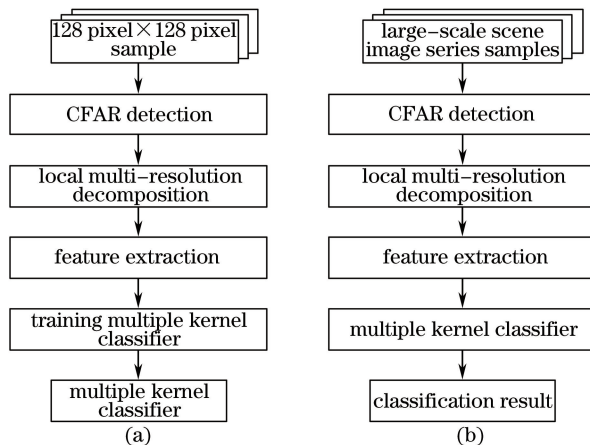


图1 (a) 多核分类器离线训练流程; (b) 大场景多目标在线识别流程

Fig. 1 (a) Flow chart of multiple kernel classifier off-line training; (b) flow chart of large scale scene multi-target on-line recognition

3 基于目标识别的UKF跟踪方法

虽然传统的卡尔曼滤波器(KF)有一些好的特性,但它假设对象特性为线性,且噪声满足高斯分布。对于基于SAR图像的目标跟踪,这些假设通常难以满足。因此,利用无损卡尔曼滤波算法^[21]。

在滤波器与分类结果的合成方面,利用前述目标特征提取、多尺度核方法和自动目标识别系统,针对目

标图像序列,进一步研究设计了基于检测识别的目标跟踪系统。主要思路是:首先将大场景实时图像序列进行图像分割,获得感兴趣区,然后通过二值化,计算得到每个感兴趣区的重心,重心坐标一方面作为 KF 和 UKF 跟踪的目标参数,通过滤波器后,可以得到预测的目标坐标,修正后进行下一步预测;另一方面重心也是进行局部多分辨率分解、获得特征向量的基准点,将特征向量输入多尺度核分类器,可以对目标进行识别,区分出虚警,并对多类目标进行分类,最终得到目标的类型和坐标,实现目标的跟踪。

识别每一帧图像中的目标后,可以根据相邻帧之间目标的相应关系,利用跟踪滤波器对目标的运动参数进行估计,并不断利用实际测量值进行修正,实现目标的跟踪,最终实现对目标的标定,得到目标的坐标、类型等信息。

4 大场景 SAR 序列图像的仿真生成

基于以上原理,利用 MSTAR 数据集中的车辆目标和大幅度杂波背景图像,构建了两组多类目标 SAR 序列图像。图像序列 I 采用静止背景,其中有 3 类目标共 6 个并沿直线运动,其中 T72、BMP2 和 BTR70 各 2 个,分别取自测试集中的样本。T72 取自 SN_S7 中的 HB03445 和 HB03446, BMP2 取自 SN_C21 中的 HB03407 和 HB03410, BTR70 取自 SN_C71 中的 HB03445 和 HB03446。图像序列 II 采用相对复杂的背景,目标也是 3 类 6 个,不同帧中目标的旋转角度不断变化。3 类目标也是取自 MSTAR 数据集中测试集 SN_S7, SN_C21 和 SN_C71 中不同视角的切片。

为检验算法的稳健性和实用性,对于动态帧中的目标,将原切片图像中的目标进行了非结构化处理,给目标加入相干斑噪声,嵌入大场景图像背景中。这些包含目标的图像帧构成了目标运动图像序列。具体步骤如下:

- 1) 用 CFAR 检测,对选取切片中的目标进行分割,仅保留较大的目标区域,去除较小杂波和噪声点;
- 2) 给分割后的目标加入均值为 0、方差为 0.04 的相干斑噪声;
- 3) 确定图像序列中目标的运动轨迹。对于静止背景图像序列,目标轨迹设定为直线,场景随目标运动不变;对于动态背景图像序列,目标轨迹设定为曲线,场景随目标运动不断变化;
- 4) 按照轨迹点坐标,将非结构化处理后的目标嵌入大场景图像中,生成第 X 帧图像。对于静止背景图像序列,直接沿运动轨迹直线在下一个轨迹点对应嵌入各目标,生成第 $X+1$ 帧图像;对于动态背景图像序列,先将各目标按照运动轨迹旋转一定角度,然后嵌入各自的下一个轨迹点,生成第 $X+1$ 帧图像;
- 5) 重复步骤 1)~4),即可生成大场景 SAR 序列图像。

5 仿真实验及结果分析

5.1 目标识别实验

基于 MSTAR 数据集,验证 4 级局部多分辨率特征提取和多尺度最小二乘支持向量分类机(LSSVC)的识别性能。采用一对一方法,将多类问题转换为两类问题。多尺度核参数分别为 $\sigma_1=4000$, $\sigma_2=2000$, $\sigma_3=1000$, $\sigma_4=500$, 惩罚系数为 $C = \{1, 10, 100, 1000\}$ 。通过不同的特征、LSSVC 以及多尺度 LSSVC 进行比较实验,最终的分类结果如表 1 所示。表中数据为选择不同参数时各种方法的最高正确率。

表 1 不同特征提取及分类器方法下的 ATR 结果

Table 1 ATR results of different feature extraction methods and classifiers

Feature extraction method	Dimension of features	Classifier	Recognition rate
Hu's moment	7	LSSVC	0.7313
Wavelet moment	7	LSSVC	0.8469
	17	LSSVC	0.9184
Wavelet moment + entropy	7	LSSVC	0.8776
	17	LSSVC	0.9660
Principal component analysis	196	LSSVC	0.9643
Local multi-resolution feature	161	LSSVC	0.9802
Local multi-resolution feature	161	Multi-scale kernel classifier	0.9897

从实验结果看,基于局部多分辨分解的特征提取方法分类正确率相对更高。测试样本总数为 1365,正确识别的样本数为 1351,正确率为 98.97%。与传统方法相比,在目标特征的快速提取、特征向量的维数等方面均有较大的优势,证明了其对 SAR 图像车辆目标的识别非常有效。

5.2 目标跟踪实验

按照 2.2 节中的目标识别和跟踪步骤,进行目标跟踪实验。将序列图像每一帧中的可能目标区域分割出来,经过实时的目标检测、识别,送入目标跟踪滤波器,进行每一个目标运动的测量和估计,最终实现目标的 UKF 跟踪和依据重心的定位。

图 2 所示为图像序列 I 下,利用 UKF 实现的多类/多个车辆目标的跟踪结果图。每一个目标的标识框中有一个红色的点,表示目标位置的测量值,随着目标的运动、图像序列的运行,每个目标会出现一个向其运动的绿色的点,表示当前帧目标位置的预测值。每一帧图像中会检测出若干个包含目标的方框,用不同颜色标识,其中有识别出的目标,也存在虚警。从每一帧的识别和跟踪效果来看,虽然存在虚警,但待识别目标的分类完全正确,跟踪过程中也未出现错标识和目标丢失的情况。图 3 所示为标号为 5 的车辆目标的横、纵坐标 KF 和 UKF 跟踪过程曲线。从该曲线可以看出,跟踪过程中,UKF 对目标位置的预测值能更快地收敛到目标的测量值(即真实值),经过很少的几帧图像后就可以快速收敛到目标的实际位置,验证了 UKF 极好的收敛速度。

采用相同的方法对图像序列 II 进行实验,利用 UKF 实现多类/多个车辆目标的跟踪。图 4 所示为标号

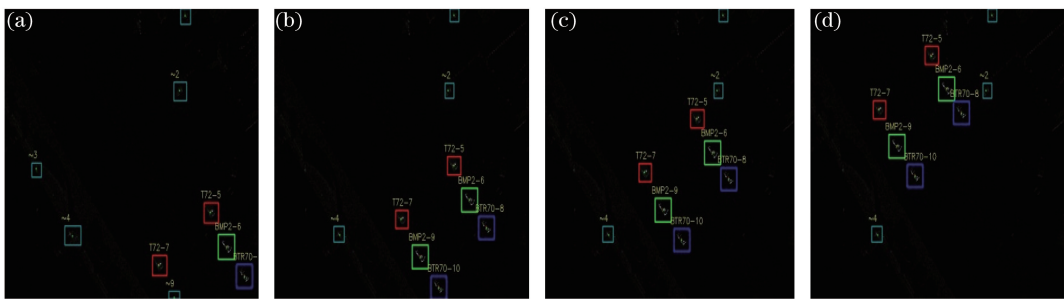


图 2 图像序列 I 的目标 UKF 跟踪结果。(a)第 100 帧;(b)第 160 帧;(c)第 220 帧;(d)第 301 帧

Fig. 2 Target UKF tracking results of image series I. (a) 100th frame; (b) 160th frame; (c) 220th frame; (d) 301st frame

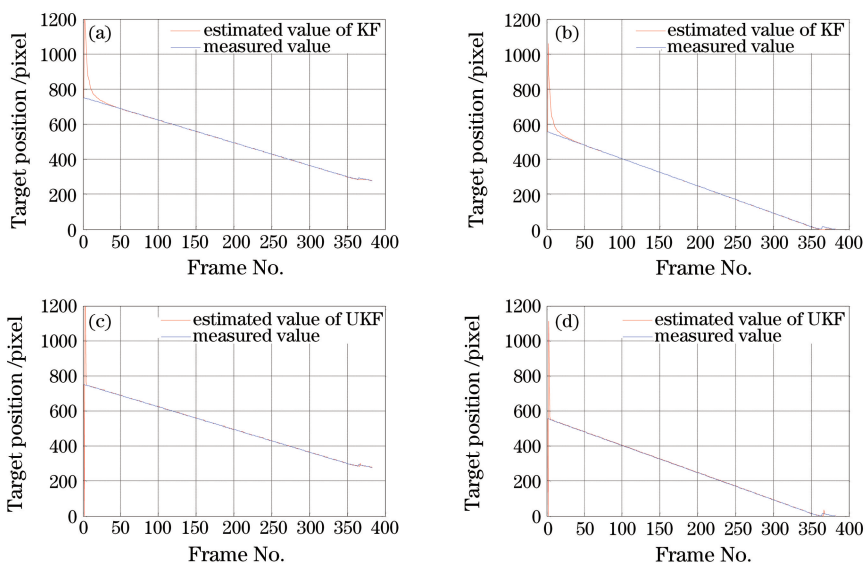


图 3 标号为 5 的目标横、纵坐标 KF 和 UKF 跟踪曲线。(a)横坐标 KF 跟踪曲线;(b)纵坐标 KF 跟踪曲线;
(c)横坐标 UKF 跟踪曲线;(d)纵坐标 UKF 跟踪曲线

Fig. 3 Horizontal and vertical coordinate tracking curves of No. 5 target. (a) Horizontal coordinate tracking curve using KF; (b) vertical coordinate tracking curve using KF; (c) horizontal coordinate tracking curve using UKF; (d) vertical coordinate tracking curve using UKF

为 2 的目标的横、纵坐标 KF 和 UKF 跟踪过程曲线。跟踪结果再次证明 UKF 具有更好的目标跟踪特性,收敛速度也更快。

5.3 目标跟踪精度分析

采用 UKF 跟踪方法,记录两个图像序列的定位数据及误差。通过统计目标中心坐标的预测值和真实值,可计算得到两坐标之间的距离,即为预测误差。图像序列的帧属性和目标检测结果如表 2 所示。

目标的跟踪误差如表 3 所示。从表中数据可以看出,目标定位精度较高,在图像序列 I 的实验中,目标 7 的平均误差最大,为 1.85 pixel,目标 9 的平均误差最小,为 1.27 pixel。而在图像序列 II 的实验中,目标 4 有 2.65 pixel 的最大平均误差,目标 5 的平均误差最小,为 1.33 pixel。在跟踪过程中,两组图像序列除了在前 120 帧中出现若干帧目标未检测到的情况外,目标的后续检测和识别均未出现错误,目标跟踪非常连贯,目标关联正确。

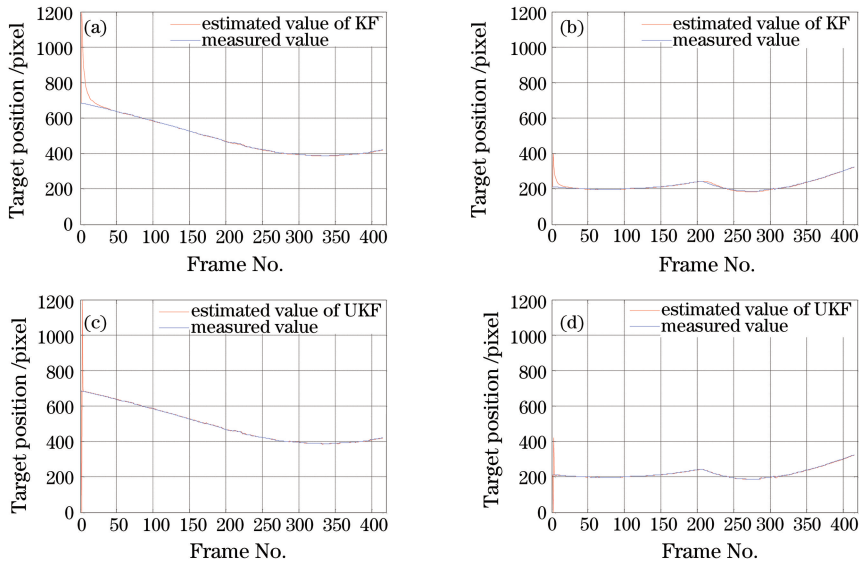


图 4 标号为 2 的目标横、纵坐标 KF 和 UKF 跟踪曲线。(a)横坐标 KF 跟踪曲线;(b)纵坐标 KF 跟踪曲线;
(c)横坐标 UKF 跟踪曲线;(d)纵坐标 UKF 跟踪曲线

Fig. 4 Horizontal and vertical coordinate tracking curves of No. 2 target. (a) Horizontal coordinate tracking curve using KF; (b) vertical coordinate tracking curve using KF; (c) horizontal coordinate tracking curve using UKF; (d) vertical coordinate tracking curve using UKF

表 2 图像序列大小、帧数及检测目标个数

Table 2 Size of image series, number of frames and number of detected targets

Image series	Frame size	Number of frames	Number of detected targets		
			Real target	False alert	Total
I	768 pixel×576 pixel	417	6	5	11
II	768 pixel×576 pixel	417	6	0	6

表 3 目标跟踪误差

Table 3 Target tracking error

Image series I			Image series II	
Target No.	Average error /pixel		Target No.	Average error /pixel
5	1.41		0	1.61
6	1.31		1	1.37
7	1.85		2	1.50
8	1.69		3	1.69
9	1.27		4	2.65
10	1.55		5	1.33

6 结 论

通过以上分析和仿真实验可以看出,基于高分辨率图像序列,充分利用图像目标的深层特征信息,结合高性能分类器和跟踪滤波器,实现多类慢动目标的识别和跟踪,具有目标识别正确率高、跟踪高效准确的特点。该研究为高分辨率 SAR 图像慢动多目标的检测、识别与跟踪提供了理论依据,提出的特征提取、多核分类器设计及与 UKF 融合的方法还可应用于其他类型的图像序列,在目标探测、定位、实时战场态势监测、毁伤效果评估等领域具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Sun Kang, Zhou Zhiqiang. Robust ground target tracking using multi-resolution motion prior [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(5): 34-39.
孙 抗, 周志强. 采用多分辨率运动先验的地面目标稳定跟踪 [J]. *光电工程*, 2013, 40(5): 34-39.
- 2 Zhang Jianwei. High-precision extended object tracking based on region feature matching [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(5): 051004.
张建伟. 基于区域特征匹配的扩展目标高精度跟踪 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(5): 051004.
- 3 Xie Bin, Xiang Zhiyu. A ground target tracking approach for UAVs with intermittent measurements [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(1): 38-43.
谢 斌, 项志宇. 一种间断观测下的无人机地面目标跟踪方法 [J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(1): 38-43.
- 4 Zhou Qianfei, Liu Jinghong, Xiong Wenzhuo, *et al.*. Multi-target self-determination orientation system based on airborne photoelectric imaging platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112005.
周前飞, 刘晶红, 熊文卓, 等. 机载光电成像平台的多目标自主定位系统研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112005.
- 5 Song Xin. Research and implementation of infrared ground target detection, recognition and tracking [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
宋 新. 红外地面目标的检测、识别与跟踪技术研究及实现 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- 6 Wang Zebing, Yang Wei, Qin Li. Target tracking based on particle swarm optimization using dynamic pyroelectric infrared sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1004001.
王泽兵, 杨 卫, 秦 丽. 基于粒子群算法的动态热释电目标跟踪 [J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1004001.
- 7 Chen H, Tang M, Lu H Q. Object tracking in infrared imagery [C]. *SPIE*, 2003, 5286: 422-427.
- 8 Huang Y L, Pei J F, Yang J Y, *et al.*. Neighborhood geometric center scaling embedding for SAR ATR [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(1): 180-192.
- 9 Liu X, Huang Y L, Pei J F, *et al.*. Sample discriminant analysis for SAR ATR [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(12): 2120-2124.
- 10 Ulmke M, Koch W. Road-map assisted ground moving target tracking [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(4): 1264-1274.
- 11 Wang Zhongqiang, Li Qinfu, Zhou Lei. Research on algorithm of ground target tracking in airborne radar [J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2010, 5(4): 405-408.
王忠强, 李钦富, 周 雷. 基于机载雷达的地面目标跟踪算法研究 [J]. *中国电子科学研究院学报*, 2010, 5(4): 405-408.
- 12 Kwok R, Curlander J C, McConnell R, *et al.*. An ice-motion tracking system at the Alaska SAR facility [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(1): 44-54.
- 13 Daida J, Vesecky J. Object-oriented techniques for feature-tracking algorithms of marginal ice zone SAR images [C]. *Proceedings of Annual International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, 1990: 1885-1886.
- 14 Strozzi T, Luckman A, Murray T, *et al.*. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2384-2391.
- 15 Yang Z, Soumekh M. Adaptive along-track multi-channel SAR interferometry for moving target detection and tracking [C]. *Proceedings of IEEE International Radar Conference*, 2005: 337-342.
- 16 Kirubarajan T, Bar-Shalom Y, Pattipati K R, *et al.*. Ground target tracking with variable structure IMM estimator [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(1): 26-46.

- 17 Xia Bin, Xu Jia, Tang Jun, *et al.*. Moving ground target detection based on SAR multi-look image sequence tracking[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011, 51(7): 977-982.
夏 斌, 许 稼, 汤 俊, 等. 基于多视图图像序列跟踪的 SAR 地面运动目标检测 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(7): 977-982.
- 18 Gönen M, Alpaydin E. Multiple kernel learning algorithms[J]. Journal of Machine Learning Research, 2011, 12: 2211-2268.
- 19 Sonnenburg S, Rätsch G, Schäfer C, *et al.*. Large scale multiple kernel learning [J]. Journal of Machine Learning Research, 2006, 7: 1531-1565.
- 20 Wang Hongqiao, Sun Fuchun, Cai Yanning, *et al.*. On multiple kernel learning methods[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(8): 1037-1050.
汪洪桥, 孙富春, 蔡艳宁, 等. 多核学习方法 [J]. 自动化学报, 2010, 36(8): 1037-1050.
- 21 Gönen M, Alpaydin E. Regularizing multiple kernel learning using response surface methodology [J]. Pattern Recognition, 2011, 44(1): 159-171.