

高时相星载序贯SAR图像运动目标检测方法

陈 杰 杨 威* 王亚敏 李春升

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 该文针对低信杂噪比条件下运动目标检测难的现状, 提出了高时相星载序贯合成孔径雷达(SAR)图像运动目标检测方法。首先, 根据检测机理的不同将现有星载SAR运动目标检测方法分为3类, 并进行了对比分析; 其次, 基于凝视观测模式建模分析了高帧频序贯SAR图像获取方式; 在此基础上, 将运动目标检测等效为未知尺度、未知到达时间的一维瞬态微弱扰动信号检测, 并理论分析了沿时间维高帧频序贯SAR图像间运动目标幅度扰动的sinc函数形式, 背景杂波幅度的缓变和系统噪声幅度的无规则快变状态; 再次, 为实现目标和杂波、噪声的可分性, 基于核函数机理实现了运动目标在高维空间的深度关联; 最后, 通过仿真和真实数据验证了所提方法的有效性, 并分析了检测性能。性能分析结果表明在低信杂噪比条件下所提方法检测性能优于传统的恒虚警类方法。

关键词: 低信杂噪比; 星载合成孔径雷达; 微弱扰动; 高时相; 深度关联

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2022)06-1048-13

DOI: 10.12000/JR22184

引用格式: 陈杰, 杨威, 王亚敏, 等. 高时相星载序贯SAR图像运动目标检测方法[J]. 雷达学报, 2022, 11(6): 1048-1060. doi: 10.12000/JR22184.

Reference format: CHEN Jie, YANG Wei, WANG Yamin, *et al.* Moving target monitoring algorithm based on high-frame-rate SAR images[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(6): 1048-1060. doi: 10.12000/JR22184.

Moving Target Monitoring Algorithm Based on High-frame-rate SAR Images

CHEN Jie YANG Wei* WANG Yamin LI Chunsheng

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To alleviate the difficulty in monitoring a moving target under a low signal-to-clutter-noise ratio, this paper proposes a moving target monitoring method with high frame-rate spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) images. First, based on the detection mechanism, current spaceborne SAR moving target detection methods are divided into three categories, and a comparative analysis is performed. Second, the acquisition method of a high-frame-rate SAR image sequence is analyzed based on the staring observation mode. Then, the moving target detection is equated to one-dimensional transient weakly perturbed signal detection with unknown scale and arrival time. Next, the sinc-function form of moving target perturbation between high-frame-frequency SAR images, slowly changing background clutter, and irregular fast-changing state of system noise are analyzed theoretically. To separate the target, clutter, and noise, the deep correlation of the moving target in high-dimensional space is realized based on the kernel function mechanism. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation experiments and real SAR data, and under a low signal-to-clutter-noise ratio, the detection performance of the proposed method is better than the traditional method of constant false alarm rate.

Key words: Low signal-to-clutter-noise ratio; Spaceborne SAR; Weak perturbation; High-frame-rate; Deep correlation

收稿日期: 2022-09-08; 改回日期: 2022-11-17; 网络出版: 2022-11-28

*通信作者: 杨威 09707@buaa.edu.cn *Corresponding Author: YANG Wei, 09707@buaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62271028)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62271028)

责任主编: 孙显 Corresponding Editor: SUN Xian

1 引言

时相处理技术是指具有时变特征信息感知能力的信息获取技术与高速信息处理技术融合构成的动态信息感知技术。主要目的是检测目标的时变特征,如形状、位置、光谱以及其他属性;主要方法是以一定时间间隔采集目标的图像、光谱等信息,获取同时涵盖空间、光谱和时间等维度的动态变化数据,并及时提取有用信息;主要手段包括紫外、可见光、红外、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)等几何形状成像,光谱、偏振、频段、极化等波动特征检测,还可包括温度、压力、距离、梯度等参数获取,等等。

和传统遥感处理技术相比,时相处理技术具有显著的优势。传统的遥感处理技术对图像或数据进行单独处理,更注重空间关系,而没有充分利用图像或数据沿时序的内在联系,其中体现动态变化的信息被认为是干扰或噪声而没有加以利用,极大损失了遥感图像或数据的应用价值。而时相处理技术则通过联合处理的方法,挖掘图像或数据之间的时空域内在联系,掌握其规律,增加了信息获取的自由度,从而得到单幅图像难以获取的信息,尤其可应用在运动目标检测方向。

目前,根据检测机理的不同可将星载SAR运动目标检测方法分为3类:第1类是利用运动目标和静止目标在信号域或图像域的差异性信息进行检测,如前置滤波方法^[1]、维纳-维勒(Wigner-Ville)分布方法^[2]、反射率偏移法^[3]、截断平均法^[4]、滤波器组峰值检测器法^[5]、速度相关函数方法^[6,7]等,该类方法对系统硬件要求低,工程实现简单,但面临杂波抑制困难,动目标检测性能欠佳的问题,尤其是星载平台;第2类方法是基于静止杂波对消的思路,即方位向多通道接收技术,经典算法有相位中心偏置天线(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)^[8,9]、沿迹干涉(Along-Track Interferometry, ATI)^[10,11]和空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)^[12-14],以及基于上述3个经典算法的改进^[15-17],该类算法检测效果较好,但对系统复杂度要求较高,数据处理流程复杂,且杂波对消效果同杂波幅度和相位分布的统计模型密切相关;第3类是基于中、低时相处理思想实现动目标检测,途径是获取同一观测场景的多幅序贯SAR图像,如基于标准互相关准则法^[18]、双向波束(Bidirectional, Bi-di) SAR 图像法^[19]、基于方位向多角度观测法^[20]、基于子孔径图像的差分和聚类法^[21]等,该类方法对图像信杂噪比(Signal-to-Clutter-Noise Ratio, SCNR)要求较高,在实际应用中需要考虑

杂波、噪声的影响,同时当目标速度较大、散焦较为严重时,仍存在信息提取困难、目标难以检测的问题。上述3类方法多具有“重视能量关联特征的比较、忽视动态变化特征的分析”的特点,即对能量关联的静态特征分析多,对特征变化的规律研究不足。尤其在低SCNR条件下,运动目标淹没在杂波中,直接利用目标与杂波能量关联方法难以检测,此时可以采用高时相处理技术,精确感知目标快变信息。

和中、低时相处理技术^[22]相比,高时相技术主要是利用动目标、杂波和噪声的特征(幅度、相位等)随时间变化的差异性实现目标检测,能有效降低对图像信噪比、信杂比的要求,然而高时相技术研究目前处于起步阶段,仍面临信噪比低、杂波时空起伏变化复杂、信息提取困难等问题。

针对上述应用需求和面临的困难,本文旨在将高时相处理理论应用于星载SAR系统中,重点研究基于核函数的深度关联方法,实现低SCNR条件下多运动目标检测,显著提升星载SAR遥感应用水平。

2 高时相星载SAR图像获取

传统SAR将高空间分辨率和宽测绘带作为设计宗旨,以期获取更多目标细节和更大的观测范围,基于所获取的方位向和距离向二维信息,利用运动目标强度、轮廓等分辨目标。通过提高对同一观测场景的时间分辨率,可获取高帧频SAR图像,即高时相模式,将信息扩展到三维,利用增加的时间维提供更多的时空自由度。由于SAR是通过增加合成孔径时间来提高空间分辨率,因此高时相模式空间分辨率较低,意味着运动目标在同一像元内停留多帧,且目标时刻处于运动状态,则这类停留类似于一维时序扰动。下面将重点介绍高时相星载序贯SAR图像获取方法。

目前获取高帧频SAR图像序列方式主要有3种,一是频带划分或方位向多视处理,二是多星接力观测,三是多方位角观测。第1种方式又可分为子孔径重叠和不重叠两种方式,重叠方式无法保证各帧图像数据之间的独立性,不利于一维时序扰动检测,同时由于传统SAR合成孔径时间有限,不重叠方式所获取的SAR图像序列较少,难以满足目标检测需求;第2种方式显著增加系统规模,且对于各向异性且变化较大的场景,该方式对轨道构型要求极高;第3种方式是当SAR卫星过境时不断调整天线方位向观测角度,实现对同一场景的长时间凝视观测。得益于相控阵天线的大角度扫描能力,本文的高帧频SAR图像主要通过第3种方式获取,以图

像空间分辨率为依据将获取的长时间凝视观测回波数据在方位时间域进行切分,距离向通过多视处理将分辨率降低至和方位向相当。高时相星载SAR回波仿真流程如图1所示,图像序列获取方式如图2所示,其中SAR成像处理和图像配准在后向投影(Back Projection, BP)算法^[23,24]中可以合二为一,避免复杂且耗时的配准过程,同时基于算法优化和图形处理器(Graphics Processing Units, GPU)并行加速能极大改善BP成像处理速度。

3 高时相星载SAR动目标检测

本节主要介绍基于高时相星载SAR图像序列的动目标检测方法,主要包括动目标扰动建模、目标/噪声/杂波时变关联特征分析以及基于核函数的深度关联方法。

3.1 动目标扰动建模

高时相SAR通过减少合成孔径时间获得高帧频图像序列,由等效噪声系数定义可知,能量积累的减少将导致信噪比降低。高时间分辨率模式中,运动目标散焦现象较弱有利于高速运动目标信息捕获,同时,可从高帧频图像中获得运动目标、噪声和杂波的统计信息,从而辅助运动目标检测。本文

所提基于高时相数据深度关联的运动目标检测方法,将传统的空间维度或时空维度的运动目标检测转换到时间维度,对任意像元,当有运动目标经过时,其幅度信息在序贯SAR图像间会发生变化,可以将该变化视为一种扰动信号,从而将检测问题转化为未知尺度、未知到达时间的一维瞬态微弱扰动信号检测。一维是指将对二维图像的检测转换为任意像元沿时间维度的检测;瞬态是指高时间分辨率,相较于长合成孔径时间SAR图像更能体现目标运动瞬时影响;微弱是指高时相模式的低SCNR;扰动是指目标运动导致所经过像元的幅度发生变化。

根据上述分析,高时相SAR图像中的像元可以分为两类,一类是有运动目标经过的像元,另一类是始终无运动目标经过的像元。该扰动示意如图3所示,其中不同颜色代表信号强弱,相邻像元信号扰动之间存在时间间隔,需要说明的是无运动目标干扰的杂波所在像元沿时序也存在幅度变化,比如恶劣海况下的海平面,其后向散射系数(Radar Cross Section, RCS)会随时间变化,图3为了突出运动目标扰动的影响,认为无运动目标扰动的像元幅度不变或变化幅度较缓。运动目标检测可以等效为对SAR图像像元的分类,如式(1)所示:

$$\begin{cases} H_0 : g_{i,j}(pT_f) = b_{i,j}(pT_f) + n_{i,j}(pT_f), \text{ 无运动目标经过} \\ H_1 : g_{i,j}(pT_f) = b_{i,j}(pT_f) + n_{i,j}(pT_f) + t_{i,j}(pT_f), \text{ 有运动目标经过} \end{cases} \quad (1)$$

其中, H_0, H_1 分别表示无运动目标经过的像元和有运动目标经过的像元, i, j 分别代表待测像元方位向和距离向位置, $b_{i,j}, n_{i,j}, t_{i,j}$ 分别代表杂波、噪声和运动目标信号幅度, T_f 为帧图像时间分辨率, p 为帧图像序号, 且通过 p 可得到待测像元被目标扰动的时刻。

3.2 目标/噪声/杂波时变关联特征分析

3.1节将运动目标检测等效为扰动检测,扰动包括位置扰动和幅度扰动,下面将首先分析运动目标扰动形式。由SAR工作原理可知,沿方位向/距离向的二维回波信号均是线性调频信号, SAR图

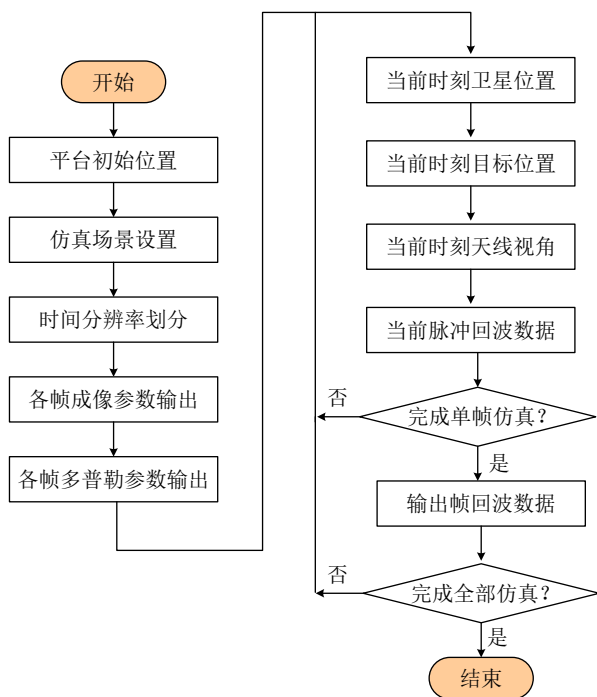


图 1 高时相星载SAR回波仿真流程图

Fig. 1 The flowchart of high-frame-rate spaceborne SAR simulation

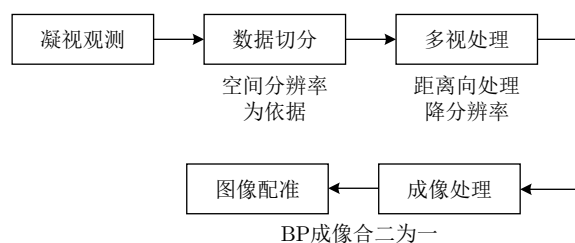


图 2 高时相星载SAR图像序列获取

Fig. 2 The process of high-frame-rate spaceborne SAR images

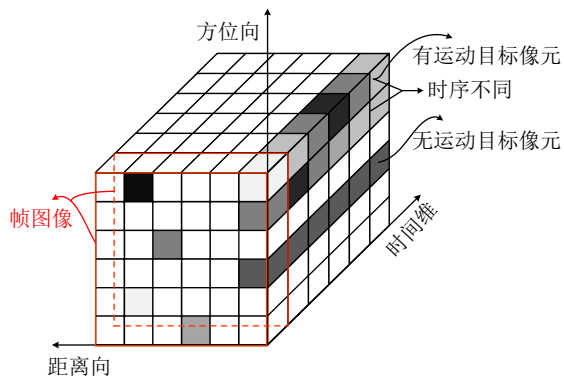


图3 沿时序目标一维瞬态扰动示意图

Fig. 3 The schematic diagram of one-dimensional temporary disturbance of moving target along time series

像中静止点目标经过二维脉冲压缩成像处理后, 沿二维方向的成像包络都是标准的sinc函数^[25]。对于具有方位向速度的运动目标, 其方位向成像包络会产生主瓣展宽和旁瓣升高等散焦现象, 由于高时相SAR的空间分辨率较低, 目标散焦程度会降低, 图4为当图像二维分辨率均为30 m时, 100 m/s的方位向速度引起的散焦现象依然可以被忽略。序贯SAR图像间, 目标方位向运动会导致其沿方位向成像位置偏移^[26], 沿距离向成像位置偏差很小, 在小斜视条件下可以忽略^[27]; 目标距离向运动导致的序贯SAR图像间其二维成像位置偏差均很小^[26]。成像位置指的是目标聚焦幅度最大值所在位置, 高帧频SAR图像中运动目标所经过像元的幅度沿方位向时序变化就是对脉冲压缩结果的离散采样, 干扰帧数受时间分辨率和目标方位向速度的影响。综上所述, 本文所提方法要求目标具有沿方位向运动的速度。相当于高时相SAR图像序列中目标一维扰动形式就是目标的sinc函数压缩形状滑过所经过像元中心时的幅度分布, 且随着图像时间分辨率增加, 高速目标引起的散焦情况依然较弱, 不影响扰动的sinc函数形式。图4中sinc函数形式的一维扰动具有对称性, 且在sinc函数主瓣零点位置附近的时序扰动变化较快, 在主瓣峰值附近的时序扰动变化较慢, 该特征将应用在后续一维时序信号深度关联中。

本文分析中杂波采用传统的海杂波模型, 且认为海杂波的RCS随雷达观测视角和方位角变化较小, 即趋于各向同性分布。常用的海杂波幅度均值模型包括: 瑞利分布模型、韦布尔分布模型、对数-正态分布模型及K分布模型等, 不同的分布模型适用于不同的观测条件。其中, 瑞利分布模型适用于低分辨率、高擦地角情况。在高时相SAR仿真中, 图像的分辨率低, 轨道高度较高, 对地观测的擦地角较大, 适用于瑞利分布模型^[28], 因此本文将

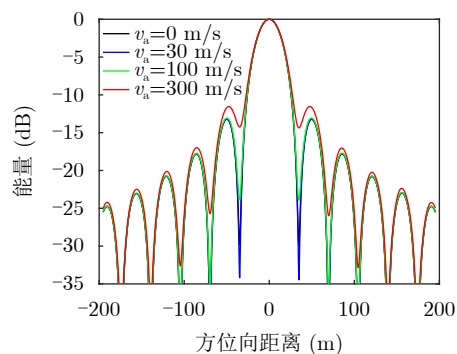


图4 30 m分辨率时运动目标方位向散焦情况

Fig. 4 The defocus of moving target with 30 m resolution along azimuth direction

基于瑞利分布模型开展时变海杂波仿真, 沿高时相一维时序海杂波的RCS会发生规律性变化, 如类似正弦波变换。

高时相模式SAR图像间噪声分布为相同的高斯噪声, 因此同一像元内噪声沿时序分布也是相同的, 且相互独立, 其幅度变化速率较快且无明显规律。由上述分析可知, 理想状态下, 运动目标、杂波和噪声沿高帧频SAR图像序列的幅度分布类型如图5所示。

虽然沿一维时序, 像元内动目标干扰幅度、杂波幅度和噪声幅度变化规律不同, 但信杂比和信噪比较低情况下提取运动目标难度较大。为此, 借鉴支持向量机(Support Vector Machine, SVM)核方法高维映射原理^[29,30], 将低维空间的线性不可分信号映射到高维空间中, 通过高维信号的线性可分性实现运动目标的有效检测。

3.3 基于核函数的深度关联方法

核方法的相似性度量特性使其在机器学习和模式识别中得到广泛应用, 基本思想是在特征空间估计内积的核, 隐式地将信号从低维空间映射到高维甚至无穷维空间, 通过特征转换实现信号在高维空间的线性可分, 从而解决低维空间的非线性问题, 因其并不涉及特征空间维数, 从而避免了维数灾难^[31]。核方法策略是将数据嵌入到一个线性可分的空间, 实现这种高维映射的核函数需要具备有限半正定性, 而Mercer定理^[32]是有限半正定性的等价形式。

假设待映射的原始信号为 $x, y \in \gamma$ (γ 为输入空间), 将其内积映射到 $\langle \phi(x), \phi(y) \rangle$, 则核函数定义为

$$k(x, y) = \langle \phi(x), \phi(y) \rangle \quad (2)$$

其中, $\phi(x), \phi(y) \in G$, G 为特征空间, $\langle \phi(x), \phi(y) \rangle$ 为 $\phi(x)$ 和 $\phi(y)$ 的内积, $k(x, y)$ 即为核函数。

通过核函数隐式定义非线性映射 $\phi(x)$, 即不显

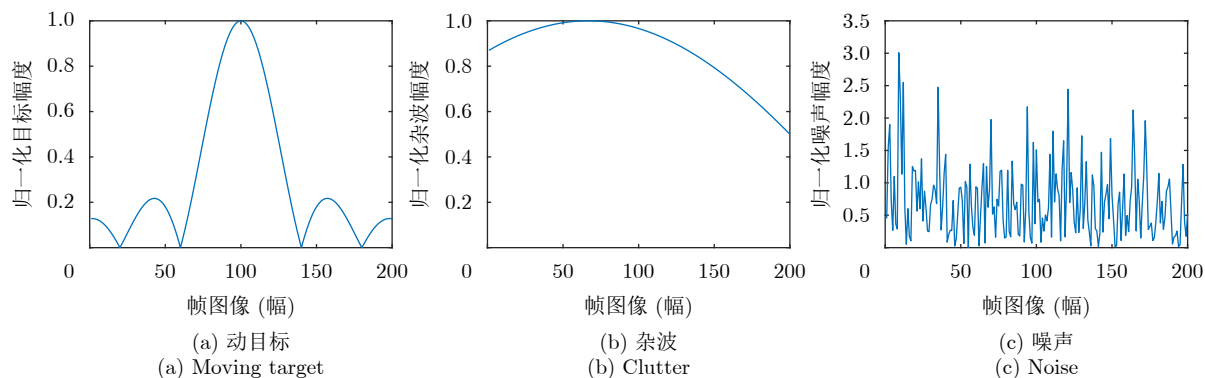


图5 动目标、杂波和噪声幅度沿时序变化示意图

Fig. 5 The amplitude variation of moving target, clutter and noise along time series

式定义映射函数 $\phi(x)$, 因为映射函数通常比核函数复杂, 很难找到映射函数解析表达式, 因此核函数不仅可以解决非线性问题, 同时能够降低计算复杂度, 这就是所谓的核技巧。同时, 对于给定的核函数, 特征空间和映射函数的选择并不是唯一的, 可以选择不同的特征空间, 即使在同一特征空间也可以选择不同的映射方式。

实际应用中, 常见的核函数有线性核、多项式核、高斯核和Sigmoid核等^[30], 不同核函数对原始数据的处理效果不同, 目前主要通过实验结果来确定所使用的核函数类型以及参数, 还没有系统的理论依据实现核函数的选择和构造。有效核函数的充分条件是满足Mercer条件, 即设在实数域有一个紧子集 X , 任意函数 $f(x), g(y)$ 满足:

$$\int_{XX} k(x, y) f(x) g(y) dx dy \geq 0 \quad (3)$$

其中, x, y 的含义与式(2)相同, $k(x, y)$ 是一个连续对称函数, 且可以表示为映射函数的内积形式, 此时 $k(x, y)$ 可称为半正定核函数。

式(3)是在连续域上规定了核函数内积形式, 在离散域中当一个对称函数在任意有限点集上定义的矩阵均为半正定时, 可确认该函数为有效核函数^[29], 并且在这些运算下是封闭的。基于简单核函数可构造复杂核函数, 即多核学习^[33,34]。多核学习采用多个基核的组合, 每个基核可以使用所有数据的特征, 也可以使用特定数据的特征。多核学习具有单核所不具备的优点, 例如决策函数的可解释性、核函数的自动选择、预测性能提升等^[29]。

考虑到动目标干扰信号沿时序的快速变化、杂波的相对稳定和噪声的无规律变化形式, 本文将高帧频SAR图像中待测像元沿一维时序的幅度作为输入, 采用线性核和指数核相结合的多核函数高维映射方式实现扰动信号检测:

$$k_m(x, y) = \sum_{i=m}^{m+W-1} |x_i - y_{i+N_d}| \exp\{|x_i - y_{i+N_d}|/\eta\},$$

$$m = 1, 2, \dots, (N_t - W - N_d + 1) \quad (4)$$

其中, x_i, y_i 是两组间隔为 N_d 的输入信号片段, 每组信号片段长度均为 W , 可将 x_i 称为前段信号, y_i 称为后段信号, i 代表输入图像沿时序的序号, N_t 为帧图像总个数, 即信号总长度, m 代表高维映射结果沿时序位置, 且映射后总长度为 $(N_t - N_d - W + 1)$, η 为关联调制系数, 本文可设定为10。

式(4)可以转化为如图6所示流程图, 首先在待测像元沿时序起始位置设置两个间隔为 N_d , 长度为 W 的滑动窗口; 然后, 将每个窗口内信号按幅度排序; 最后, 将排序后两个信号片段 (x_i, y_i) 按照式(4)深度关联, 且沿时序存放。通过上述3个步骤即可完成一次映射, 接下来以固定步长滑动两个窗口, 通常将步长设定为1, 开始下一个位置的映射, 循环往复直至遍历整个信号。其中, 排序操作目的有两个, 其一是噪声分布无序, 通过排序操作可实现噪声对消, 即减小噪声信号映射结果, 实现噪声可分; 其二是因为运动目标扰动形式具有单调性和对称性, 排序之后, 可通过映射结果的分布形状获取该像元内扰动信号幅度最大值时刻。并且, 为了简单起见, 一般可设置窗口长度和间隔相等, 即 $N_d = W$ 。

图7为图5中动目标、杂波和噪声的高维映射结

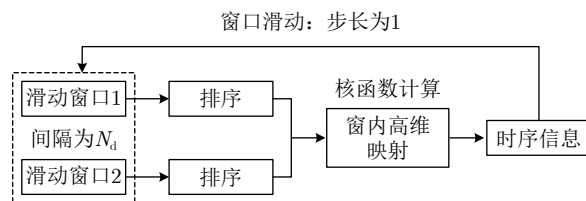


图6 基于核函数的信号高维映射流程图

Fig. 6 The flowchart of high-dimensional mapping based on kernel function

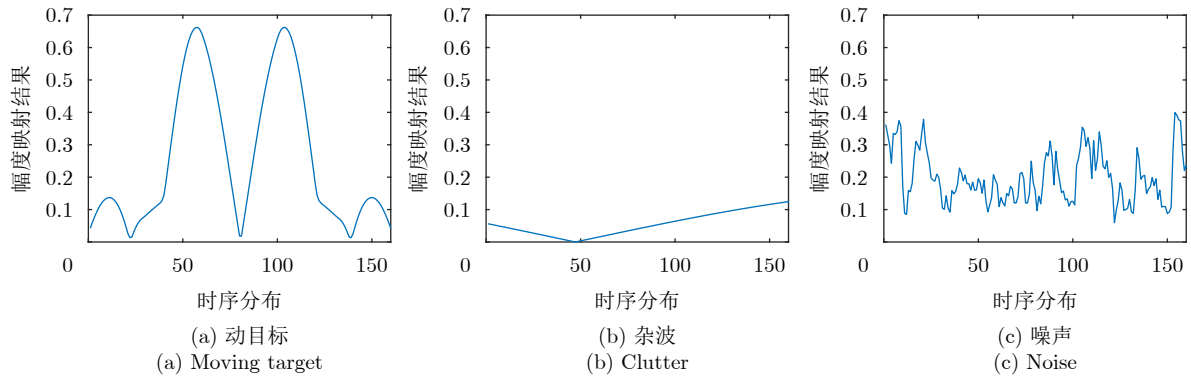


图 7 运动目标、杂波和噪声信号高维映射结果

Fig. 7 The high-dimensional mapping results of moving target, clutter and noise

果沿时序分布，对比可以发现这3类信号的高维映射结果除了幅度上的变化，沿时序形状也有明显不同，其中动目标映射结果有对称性，且两个波峰之间的波谷对应动目标扰动幅度最大值，即目标成像位置正好处于该像元中心位置；对于RCS相对稳定或者变化周期远大于运动目标扰动的杂波，经过核函数映射后其幅度会明显降低，但是对于RCS直接依赖于雷达照射角度的杂波，需要分析其变化速率和动目标干扰变化速率之间的关系，当两者变化率和幅值都相近，或者杂波的幅度变化率大于动目标干扰变化率时，通过核函数方法很难实现动目标检测；噪声映射结果依然杂乱无序，但是比图像域噪声信号变化速率慢，其原因是高斯噪声无规则分布，通过窗内信号的排序操作可对消部分噪声信号。为说明基于高时相模式的运动目标检测方法，本文分析的背景杂波属于RCS相对稳定，或随雷达视角改变其变化率远小于动目标扰动变化率的类型。

首先，对所获取的高帧频图像序列所有像元开展基于z-score标准化的归一化预处理。其次，将场景中像元沿高帧频序列图像的幅度作为一维时序信号，并经过上述核函数高维映射处理，对映射结果同样开展归一化处理。最后，开展阈值检测，设置一定的检测阈值，筛选出场景中高维映射结果最大值大于设置阈值的像元，可以暂且将该类像元归为存在运动目标扰动的像元，将高维映射结果最大值小于设置阈值的像元归为无运动目标扰动的像元；为进一步判定运动目标扰动情况以及抑制虚警，对可能存在运动目标扰动的像元，同时需要沿方位向判断邻域像元映射结果，如果邻域像元映射结果最大值同样大于设置的阈值，且多个像元呈现类似双峰对称结构，则可以判定存在运动目标扰动该像元区域，如果邻域像元映射结果最大值均小于设置阈值，形状为噪声映射后的无规则变化(如图7(c)所示)，则判定该像元存在虚警目标。本文将上述基于单一

像元映射结果的判决方法称为门限法，将联合方位邻域多像元映射结果的判决方法称为邻域法。需要说明的是，为实现目标对邻域多像元的扰动，应尽可能增加总观测时长。在确认待测像元存在目标扰动的基础上，结合高维映射后幅值波谷所在时序位置可以近似确定运动目标经过该像元中心的时刻，此处的波谷指高维映射后两个波峰(结果较大值)之间的波谷，其对应运动目标扰动sinc函数的主瓣波峰位置。综上所述，本文所提基于高时相星载序贯SAR图像的运动目标检测流程如图8所示，其中归一化处理源于两方面的考虑，一是未经归一化处理的SAR图像幅度通常较大，容易造成数据溢出，二是不同场景和分辨率下的成像结果幅度差异较大，导致深度关联结果数值上存在较大区别，无法通过自适应映射幅值判断是否存在动目标干扰。本文将高维映射后检测阈值设置为9，该数值是实验经验所得，且随着图像信杂噪比升高，检测阈值可相应增大。

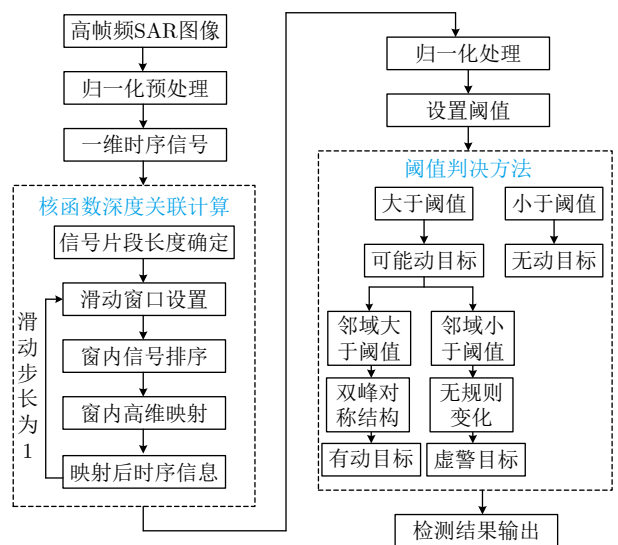


图 8 基于高时相SAR的动目标检测流程图

Fig. 8 The flowchart of moving target detection based on high-frame-rate SAR images

4 实验验证

4.1 仿真和真实数据实验

为验证本文所提方法的有效性,开展如下仿真实验,仿真参数如表1所示。首先按照步长为2 m/s,方位向速度范围是10~18 m/s,场景中共设置5个运动目标T1-T5,其RCS各不相同,因此各目标的SCNR不同,其中T2的SCNR最差为-3.3 dB,其次是T1的-3.0 dB, T3最优为0.2 dB,相当于仿真中设置的5个目标均完全淹没在杂噪中,基于传统的目标强度和轮廓等方式无法检测到运动目标。在总计7 s的凝视观测时间内共获取100帧SAR图像,图像时间分辨率为 $T_t = 0.07$ s,对应的方位向空间分辨率30 m,相应的将距离向系统带宽进行频谱切分得到二维分辨率相当的SAR图像,部分检测结果列于图9中。

图9(a)是5个运动目标成像结果,可以发现5个目标的成像位置和亮度均不同;图9(b)为被杂

波+噪声淹没的中间帧成像结果,已无法从图像中辨识运动目标;图9(c)为帧图像高维映射且归一化后的均值结果,可见有强点出现,但无法判断是否为运动目标,因为有虚警目标存在;图9(d)为将检

表 1 雷达系统仿真参数

Tab. 1 The simulation parameters of radar system

参数	数值
中心视角(°)	35.0
轨道高度(km)	1000.0
波长(m)	0.03125
天线长度(m)	4.0
天线高度(m)	1.8
轨道倾角(°)	97.44
脉冲重复频率(Hz)	4200
系统带宽(MHz)	420
采样率(MHz)	500

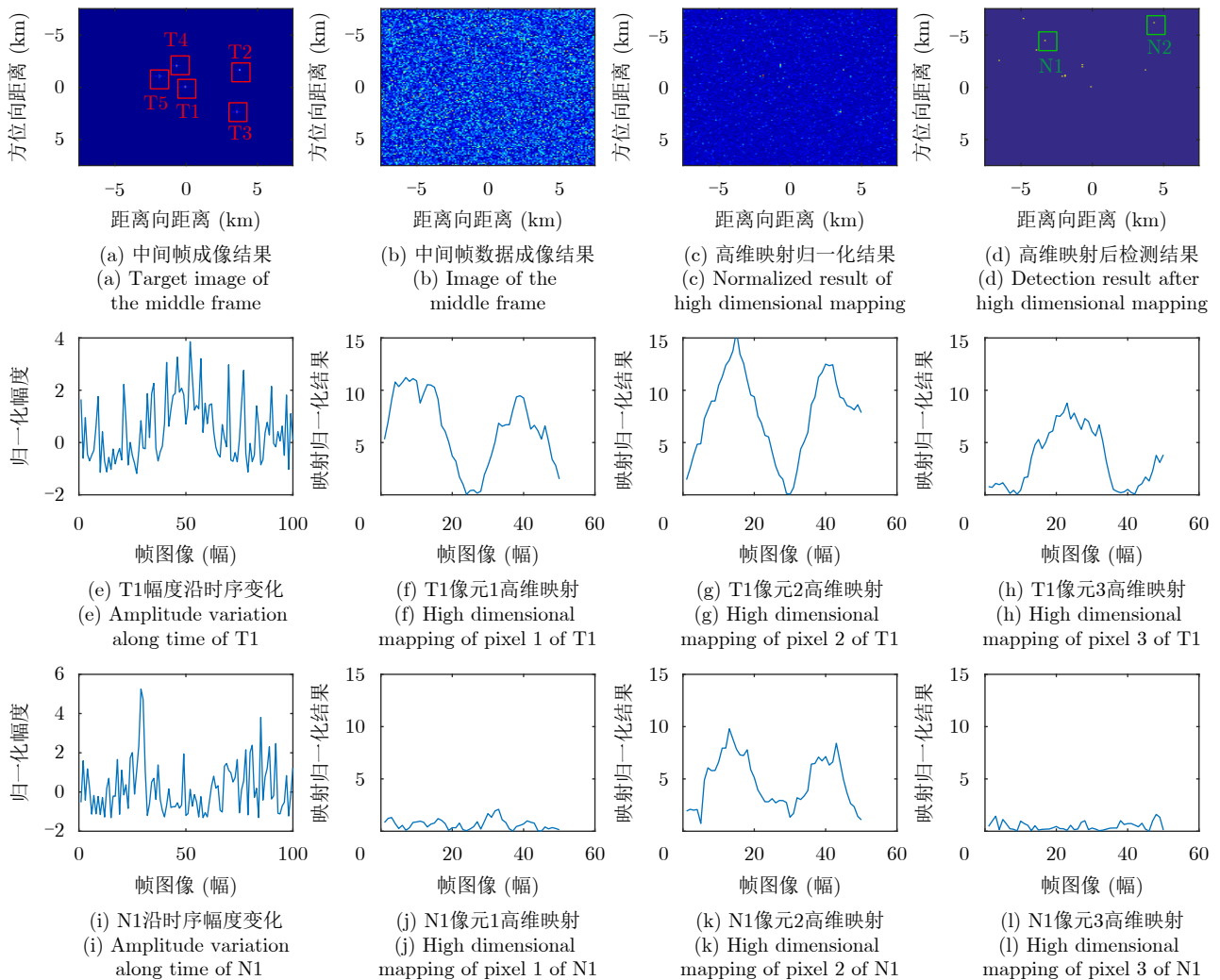


图 9 不同SCNR下慢速目标检测结果

Fig. 9 Detection results of slow moving targets with different SCNR

测阈值设置为9后滤波结果, 只保留了高维空间中的亮点; 图9(e)为原始帧图像中T1经过的一个像元沿帧图像幅度变化图, 第25~70帧信号幅度虽略有突起, 但难以确认是否是运动目标干扰引起的; 图9(f)~图9(h)为T1所干扰的3个方位向临近像元的高维映射结果, 符合sinc函数高维映射特征, 且干扰时刻存在前后时序关系, 和理论分析结论是一致的; 图9(i)~图9(l)是图9(d)中标注的虚假目标点N1的相关结果, 图9(i)是原始帧图像中N1所在像元沿帧图像幅度变化, 图9(j)~图9(l)是N1相邻3个像元的映射结果, 可见只有像元2的映射结果出现了类似sinc函数高维映射形状, 像元1和像元3高维映射幅度表现为明显的噪声+杂波映射特性, 因此可以将N1排除。图9(d)中其他亮点所在像元的确认方法类似, 逐个亮点确认后检测到全部5个运动目标, 且不存在虚假目标。

上述实验只是针对方位向速度范围在10~18 m/s

的运动目标展开的, 对于其他速度范围的目标可采用类似的检测方法, 需要调整的是图像时间分辨率, 以尽可能增大运动目标对同一像元的干扰帧数, 同时该干扰帧数也不能无限增大, 否则会影响到运动目标对像元的快速扰动特性。需要说明的是, 实际数据处理中应首先根据观测场景预估运动目标速度范围, 再多次调整SAR图像时间分辨率, 从而提高运动目标检测概率和降低虚警概率。图10在场景中设置5个方位向速度范围在20~40 m/s的运动目标T1~T5, 速度步长为5 m/s, 其RCS各不相同, 因此SCNR各不相同, T5的SCNR最差为-1.8 dB, 其次是T3的-1.4 dB, T1最优为2 dB, 在4.2 s时间内共获取100帧图像, 时间分辨率为0.042 s, 空间分辨率为50 m, 检测过程和图9相同, 其中只列出了部分检测结果, 图10(a)~图10(d)的含义与图9(a)~图9(d)相同, 图10(e)~图10(h)是T5检测结果, 其含义与图9(e)~图9(h)相同, 图10(i)~图10(l)是

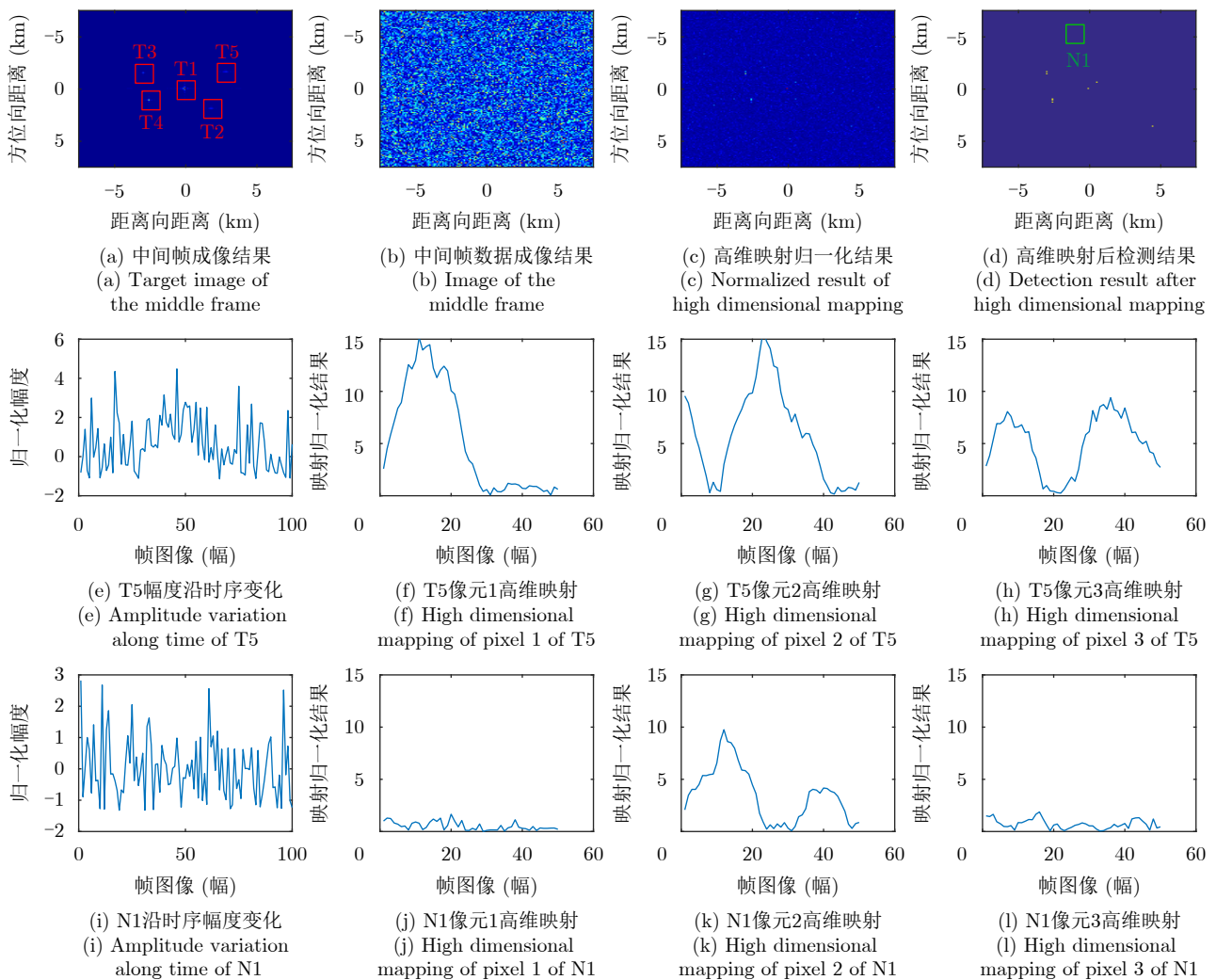


图 10 不同SCNR下快速目标检测结果

Fig. 10 Detection results of fast moving targets with different SCNR

图10(d)中标注的虚假目标点N1的相关结果,其含义与图9(i)—图9(l)相同。上述两组仿真结果表明,和基于单一像元的映射结果(门限法)相比,通过临近像元映射幅度和形状相结合的方式(邻域法)可进一步降低虚警率,否则图9(d)中N1点和图10(d)中N1点所在像元会因为高于检测阈值的映射幅值被认为是存在运动目标扰动,从而造成虚警。

首先,将基于TerraSAR-X获取的Sevastopol真实数据验证本文所提方法,原始数据图像分辨率为0.5 m,将其切分为32帧高帧频图像^[20],距离向做多视处理。图11列出了部分检测结果,其中图11(a)是原始图像中运动舰船所在位置局部成像结果,虽能分辨出舰船整体轮廓,但无法判断是否运动;图11(b)是中间帧高帧频图像,场景分辨能力较差;图11(c)为高维映射且阈值设置为7.5后的检测结果,因为数据量较少且整体信杂噪比较差,因此设置阈值降低;图11(d)为高维映射前舰船所在像元沿时序幅度变化,无法判断是否存在运动目标干扰;图11(e)为高维映射后舰船所在像元沿时序幅度变化,映射幅值较高,但未呈现双峰对称结构,原因是图中舰船速度较慢且切分后数据量有限,导致杂噪抑制效果差,舰船未完整地扰动该像元,即像元未经历舰船完整的sinc函数主瓣扰动,邻域像元也未被检测出。同理,基于该数据的检测结果中出现多个虚警目标,无法基于邻域法予以剔除。

其次,基于真实逆SAR数据开展实验验证,结果如图12所示。将原始数据切分为120帧,帧图像

时间分辨率为100 μs ,目标方位向速度约为200 m/s,由于逆SAR数据信噪比较优,图像中加入了高斯白噪声。其中,图12(a)为中间帧原始逆SAR图像,目标清晰可见;图12(b)为信噪比为-5 dB的中间帧成像结果,无法分辨目标;图12(c)为图12(a)的检测结果,目标被有效检测出且未出现虚假目标;图12(d)为图12(b)的检测结果,目标被有效检测到,但左下方出现一个虚假目标。该组逆SAR数据说明所提方法可实现低信噪比条件下运动目标检测。

4.2 检测性能分析

为进一步验证本文所提方法检测效果的影响因素,重点分析了窗口长度 W 对检测性能的影响,在每个SCNR下各开展1000次蒙特卡罗仿真,结果如图13所示。检测阈值设置为9,运动目标主瓣干扰帧数为55帧,图13(a)为检测概率:当窗口长度为10时,检测概率明显低于窗口长度为20和30的情况,且窗口长度为20时检测概率略高于长度为30,说明随窗口长度增加运动目标检测概率先增大后降低;图13(b)为虚警概率:结果表明本文所提邻域法的虚警概率明显低于门限法,降低50倍以上,而且随着窗口长度增大,虚警抑制能力得到明显提升,因为随窗口长度增加,噪声类信号的对消效果更佳明显。

下面将通过与传统恒虚警概率(Constant False Alarm Rate, CFAR)类检测方法的对比证明本文所提方法的优越性。首先,分析高帧频图像处理对图像信噪比的影响,SAR图像信噪比与图像二维分辨

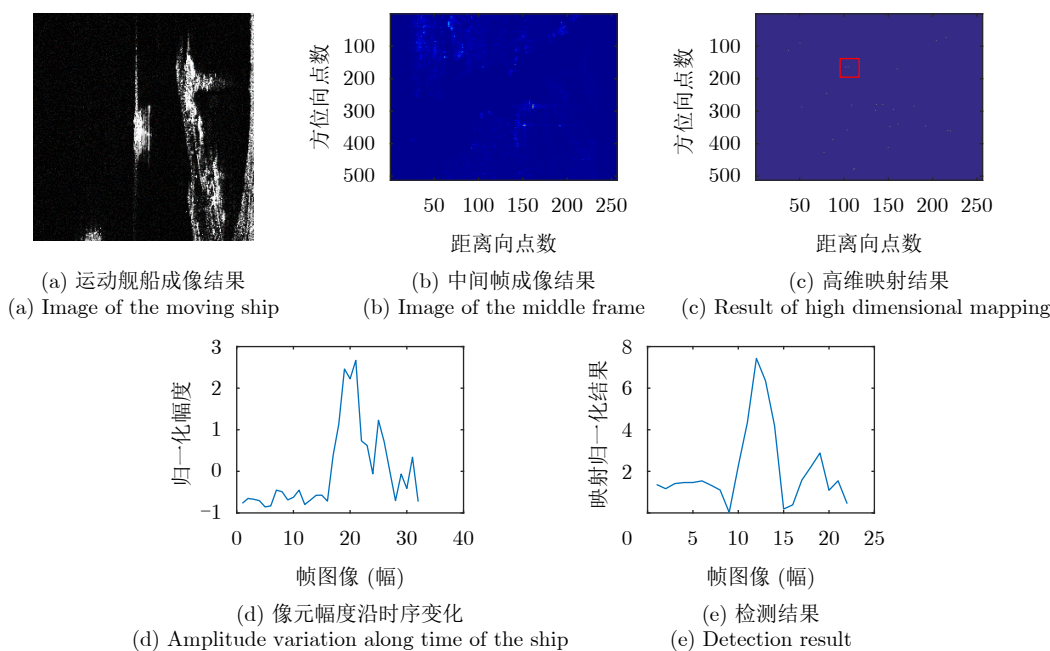


图 11 TerraSAR-X数据验证结果

Fig. 11 Verification results of TerraSAR-X data

率 ρ_a, ρ_r , 单帧图像观测时间 T_f , 接收机等效噪声带宽 B , 雷达散射截面 σ 等相关^[35], 可表示为

$$(\text{SNR})_{\text{sar}} \propto \frac{T_f \sigma}{B \rho_a \rho_r} \quad (5)$$

其中, \propto 表示正比于。

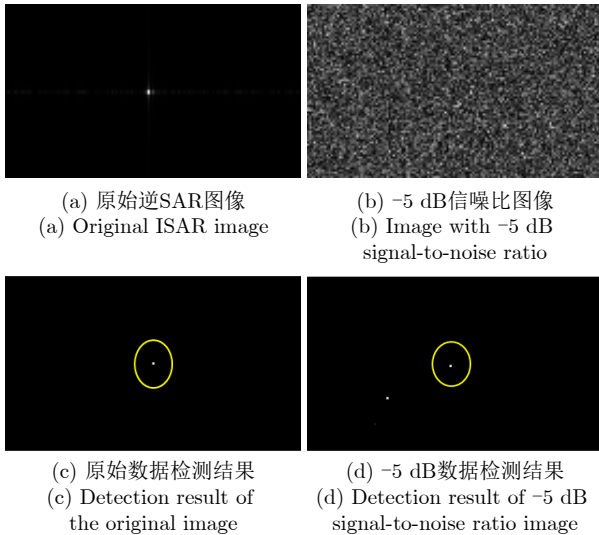
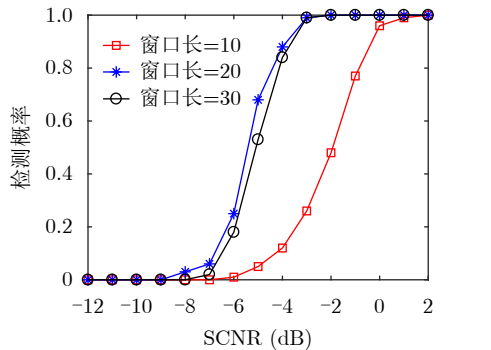


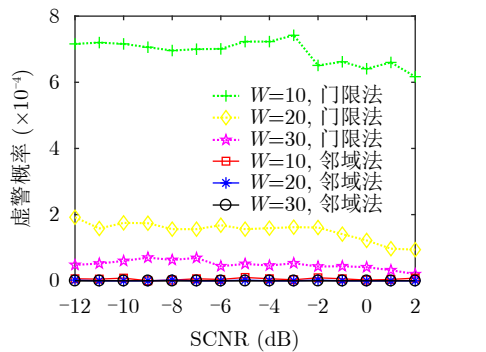
图 12 真实逆SAR数据验证结果

Fig. 12 Verification results of real inverse SAR results



(a) 检测概率随SNCR变化

(a) Variation of detection probability with SNCR



(b) 虚警概率随SNCR变化

(b) Variation of false alarm probability with SNCR

图 13 运动目标检测性能随窗口长度的变化

Fig. 13 Detection performance of moving targets with different signal length

本文距离向获取低空间分辨率图像是基于多视处理, 处理过程可认为对接收机等效噪声带宽做等同的多视处理, 即高时相模式中 $B\rho_r$ 与多视处理前相同。在高时相处理前的高分辨率图像中, 当目标尺寸大于像元面积时, 目标总的雷达散射截面均分于多个像元, 然而在高时相模式中像元面积增大, 对于尺寸小于该像元面积的目标, 信噪比计算中其雷达散射截面可作为整体参与计算, 且方位向空间分辨率降低比例与合成孔径时间缩短比例相同。综合上述分析, 假设目标面积为 30 m^2 , 处理前图像二维分辨率均为 1 m , 高时相处理后二维图像分辨率均为 30 m , 观测时长降低为原来的 $1/30$, 则相对于高时相处理前图像, 高帧频SAR图像的信噪比降低 $10 \lg 30 = 14.77 \text{ dB}$ 。基于上述分析, 在不同信噪比下分别开展1000组蒙特卡罗仿真, 采用单元平均恒虚警(CA CFAR)检测方法、单元平均选小恒虚警(SOCA CFAR)检测方法、单元平均选大恒虚警(GOCA CFAR)检测方法^[36]以及本文所提邻域检测法, 在虚警概率为 10^{-6} 情况下得到的检测概率对比结果如图14所示, 本文所提方法对应的信噪比是比图14中低约 15 dB , 即不同检测方法对应的检测条件是相同的, 图14横坐标均采用高时相处理前的信噪比数值。CA CFAR, SOCA CFAR和GOCA CFAR设置的二维保护单元均为2个, 二维参考单元均为4个。可以发现, 当检测对应的信噪比较低($\leq 6 \text{ dB}$)时, 4种方法均无法实现目标检测; 当检测对应的信噪比较高($\geq 13 \text{ dB}$)时, 4种方法的检测概率均为100%; 当信噪比低于 13 dB 时, 本文所提方法的检测概率明显高于其他3种方法, 如当信噪比为 11 dB 时, 所提方法检测概率为88%, 其余3种方法检测概率约为17%。对于SAR图像, 低于 13 dB 的信噪比条件较差, 说明本文所提方法在较差信噪比条件下运动目标检测性能更优。

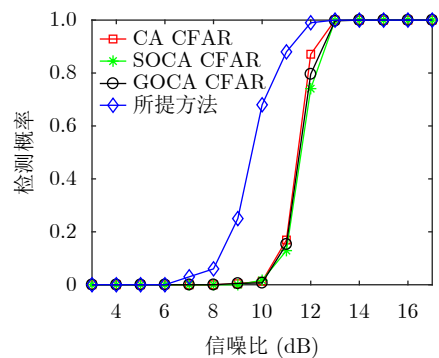


图 14 相同条件下检测性能对比

Fig. 14 The comparison of detection performance based on different methods

其次,分析高时相模式中信杂比的变化,高帧频图像处理过程中运动目标和背景杂波能量降低情况是等同的,因此图像信杂比变化较小,可以近似认为高时相模式中信杂比与处理前的高分辨率图像中相等。基于相同的瑞利分布条件,由图13可知,本文所提方法在信杂比 >-4 dB条件下检测概率 >0.8 ,虚警概率约为 10^{-6} ,然而相同条件下传统的CFAR检测方法无法实现目标检测。虽然CFAR改进算法可以进一步提高检测性能^[36],但是对于较低信杂比条件(如低于0 dB),依然无法实现目标有效检测,从而证明在低信杂比条件下,本文所提方法的检测性能更优。

上述CFAR类检测方法适用前提是假设目标是独立的以及参考窗内噪声/杂波是独立同分布的,当这两个条件不成立时,CFAR类方法可能会出现虚警概率抬高或检测概率降低的现象^[36]。例如当存在多个目标时,且一个目标位于待检测单元,其余目标位于参考单元内,则可能会引起漏警;在非均匀杂波边缘处,即待检单元位于不同反射率的区域边界时,可能会造成虚警等。而本文所提高时相运动目标检测方法主要是利用同一像元内运动目标幅度沿时序变化,对杂波或噪声的分布要求是沿像元时序,目标\杂波\噪声强度变化情况不同,即各向同性的杂波场景,对待检单元周边多个像元的分布情况要求较低。同时,当存在多个强度相当的目标时,由于高时相模式中目标对像元扰动是沿时序变化的,因此本文所提方法对目标位置之间的像元间隔要求低于CFAR类方法,且该特征可辅助判断目标运动方向。但是,CFAR类方法可同时适用于静止目标和运动目标检测,本文所提方法仅适用于运动目标。综上所述,本文所提运动目标检测方法适用场景更宽泛,且在较低信杂噪比(以图13和图14为例,高时相处理前信杂噪比低于13 dB)条件下,检测性能明显优于传统CFAR类检测方法。

5 结 语

本文对高时相星载序贯SAR运动目标检测方法进行了研究,首先对现有星载SAR动目标检测方法进行总结,针对低SCNR条件下目标检测困难的现状提出了高时相星载SAR的概念;在此基础上通过建模分析说明高帧频SAR图像序列获取方式;其次理论分析了高时相SAR图像序列中动目标、杂波和噪声的一维时序扰动形式,将动目标检测等效为未知尺度、未知到达时间的一维瞬态微弱扰动信号检测,并分析了三者的时变关联特征;再次,基于机器学习核函数思想提出了运动目标检测的深度关联

方法,将低维空间线性不可分问题转换为高维空间线性可分问题;最终,通过仿真和真实数据实验证明了所提方法的有效性和鲁棒性,并和CFAR类检测方法进行了对比,分析其检测性能。

然而,为了实现复杂背景杂波条件下运动目标多维检测,仍有很多技术难题有待突破,如更全面的检测性能影响因素分析、基于深度学习判读的检测效率提升等,这些将是后续研究的重点。

参 考 文 献

- [1] FREEMAN A and CURRIE A. Synthetic aperture radar (SAR) images of moving targets[J]. *GEC Journal of Research*, 1987, 5(2): 106–115.
- [2] BARBAROSSA S and FARINA A. A novel procedure for detecting and focusing moving objects with SAR based on the Wigner-Ville distribution[C]. *IEEE International Conference on Radar*, Arlington, USA, 1990: 44–50. doi: 10.1109/RADAR.1990.201135.
- [3] MOREIRA J R and KEYDEL W. A new MTI-SAR approach using the reflectivity displacement method[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(5): 1238–1244. doi: 10.1109/36.469488.
- [4] FIENUP J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(3): 794–809. doi: 10.1109/7.953237.
- [5] WEIHING D, HINZ S, MEYER F, et al. Detection of along-track ground moving targets in high resolution spaceborn SAR images[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006, 36(7): 7.
- [6] ARII M. Efficient motion compensation of SAR imagery by refocusing approach[C]. *Conference Proceedings of 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Tsukuba, Japan, 2013: 150–151.
- [7] ARII M. Efficient motion compensation of a moving object on SAR imagery based on velocity correlation function[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 936–946. doi: 10.1109/TGRS.2013.2245901.
- [8] 郑明洁, 杨汝良. 一种改进的DPCA运动目标检测方法[J]. *电子学报*, 2004, 32(9): 1429–1432. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2004.09.005.
ZHENG Mingjie and YANG Ruliang. An improved DPCA moving targets detecting algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(9): 1429–1432. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2004.09.005.
- [9] CHEN Yi, QIAN Bo, and WANG Shengli. DPCA motion compensation technique based on multiple phase centers[C]. *2011 IEEE CIE International Conference on Radar*, Chengdu, China, 2011: 711–714. doi: 10.1109/CIE-Radar.2011.6159640.

- [10] BUDILLON A, EVANGELISTA A, and SCHIRINZI G. GLRT detection of moving targets via multibaseline along-track interferometric SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 348–352. doi: [10.1109/LGRS.2011.2168381](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2168381).
- [11] LEE J S, HOPPEL K W, MANGO S A, *et al.* Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1017–1028. doi: [10.1109/36.312890](https://doi.org/10.1109/36.312890).
- [12] BRENNAN L E and REED L S. Theory of adaptive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1973, AES-9(2): 237–252. doi: [10.1109/TAES.1973.309792](https://doi.org/10.1109/TAES.1973.309792).
- [13] HONIG M L and GOLDSTEIN J S. Adaptive reduced-rank interference suppression based on the multistage wiener filter[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(6): 986–994. doi: [10.1109/TCOMM.2002.1010618](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2002.1010618).
- [14] CRISTALLINI D and BURGER W. A robust direct data domain approach for STAP[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(3): 1283–1294. doi: [10.1109/TSP.2011.2176335](https://doi.org/10.1109/TSP.2011.2176335).
- [15] CERUTTI-MAORI D and SIKANETA I. A generalization of DPCA processing for multichannel SAR/GMTI radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 560–572. doi: [10.1109/TGRS.2012.2201260](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2201260).
- [16] GIERULL C H, SIKANETA I, and CERUTTI-MAORI D. Two-step detector for RADARSAT-2's experimental GMTI mode[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 436–454. doi: [10.1109/TGRS.2012.2201729](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2201729).
- [17] CERUTTI-MAORI D, SIKANETA I, and GIERULL C H. Optimum SAR/GMTI processing and its application to the radar satellite RADARSAT-2 for traffic monitoring[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(10): 3868–3881. doi: [10.1109/TGRS.2012.2186637](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2186637).
- [18] KIRSCHT M. Detection and velocity estimation of moving objects in a sequence of single-look SAR images[C]. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Lincoln, USA, 1996: 333–335. doi: [10.1109/IGARSS.1996.516331](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1996.516331).
- [19] MITTERMAYER J, WOLLSTADT S, PRATS-IRAOLA P, *et al.* Bidirectional SAR imaging mode[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 601–614. doi: [10.1109/TGRS.2012.2202669](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2202669).
- [20] YANG Wei, CHEN Jie, LIU Wei, *et al.* Moving target azimuth velocity estimation for the MASA mode based on sequential SAR images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(6): 2780–2790. doi: [10.1109/JSTARS.2016.2641744](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2641744).
- [21] 申文杰, 韩冰, 林赟, 等. 多角度SAR动目标检测技术及其高分三号实验验证研究[J]. *雷达学报*, 2020, 9(2): 304–320. doi: [10.12000/JR20021](https://doi.org/10.12000/JR20021).
- SHEN Wenjie, HAN Bing, LIN Yun, *et al.* Multi-aspect SAR-GMTI and experimental research on gaofen-3 SAR modes[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(2): 304–320. doi: [10.12000/JR20021](https://doi.org/10.12000/JR20021).
- [22] 陈杰, 杨威, 王鹏波, 等. 多方位角观测星载SAR技术研究[J]. *雷达学报*, 2020, 9(2): 205–220. doi: [10.12000/JR20015](https://doi.org/10.12000/JR20015).
- CHEN Jie, YANG Wei, WANG Pengbo, *et al.* Review of novel azimuthal multi-angle observation spaceborne SAR technique[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(2): 205–220. doi: [10.12000/JR20015](https://doi.org/10.12000/JR20015).
- [23] 李春升, 杨威, 王鹏波. 星载SAR成像处理算法综述[J]. *雷达学报*, 2013, 2(1): 111–122. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.20071](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.20071).
- LI Chunsheng, YANG Wei, and WANG Pengbo. A review of spaceborne SAR algorithm for image formation[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 111–122. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.20071](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.20071).
- [24] MILLER J, BISHOP E, and DOERRY A. An application of backprojection for video SAR image formation exploiting a subaperature circular shift register[C]. *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XX*, Baltimore, USA, 2013: 874609. doi: [10.1117/12.2016417](https://doi.org/10.1117/12.2016417).
- [25] YANG Wei, CHEN Jie, LIU Wei, *et al.* A modified three-step algorithm for TOPS and sliding spotlight SAR data processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(12): 6910–6921. doi: [10.1109/TGRS.2017.2735993](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2735993).
- [26] WANG Yamin, CHEN Jie, LIU Wei, *et al.* A moving target velocity estimation method based on the MC-MASA SAR mode[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1632. doi: [10.3390/rs13091632](https://doi.org/10.3390/rs13091632).
- [27] 王亚敏, 陈杰, 杨威, 等. 基于Hybrid-TOPS的星载SAR运动目标监视新模式[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(6): 1256–1262. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0420](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0420).
- WANG Yamin, CHEN Jie, YANG Wei, *et al.* New moving target monitoring mode with Hybrid-TOPS of spaceborne SAR[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(6): 1256–1262. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0420](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0420).
- [28] 赵嘉斐, 吴敬云. 时空相关海杂波序列的仿真设计[J]. *电子设计工程*, 2018, 26(15): 54–58. doi: [10.3969/j.issn.1674-6236.2018.15.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-6236.2018.15.013).
- ZHAO Jiafei and WU Jingyun. Simulation of correlated radar sea clutter[J]. *Electronic Design Engineering*, 2018, 26(15): 54–58. doi: [10.3969/j.issn.1674-6236.2018.15.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-6236.2018.15.013).
- [29] 汪廷华, 陈峻婷. 核函数的选择研究综述[J]. *计算机工程与设计*

- 计, 2012, 33(3): 1181–1186. doi: [10.3969/j.issn.1000-7024.2012.03.068](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7024.2012.03.068).
- WANG Tinghua and CHEN Junting. Survey of research on kernel selection[J]. *Computer Engineering and Design*, 2012, 33(3): 1181–1186. doi: [10.3969/j.issn.1000-7024.2012.03.068](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7024.2012.03.068).
- [30] SHAWE-TAYLOR J and CRISTIANINI N. Kernel Methods for Pattern Analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 60–70. doi: [10.1017/CBO9780511809682](https://doi.org/10.1017/CBO9780511809682).
- [31] 肖建, 于龙, 白裔峰. 支持向量回归中核函数和超参数选择方法综述[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(3): 297–303. doi: [10.3969/j.issn.0258-2724.2008.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.2008.03.001).
- XIAO Jian, YU Long, and BAI Yifeng. Survey of the selection of kernels and hyper-parameters in support vector regression[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2008, 43(3): 297–303. doi: [10.3969/j.issn.0258-2724.2008.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.2008.03.001).
- [32] CAMPBELL C. An Introduction to Kernel Methods[M]. HOWLETT R J, JAIN L C, and KACPRZYK J. Radial Basis Function Networks 1: Recent Developments in Theory and Applications. Wien: Physica Verlag Rudolf Liebing KG, 2001: 155–192.
- [33] LANCKRIET G R G, DE BIE T, CRISTIANINI N, *et al.* A statistical framework for genomic data fusion[J]. *Bioinformatics*, 2004, 20(16): 2626–2635. doi: [10.1093/bioinformatics/bth294](https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bth294).
- [34] RAKOTOMAMONJY A, BACH F R, CANU S, *et al.* SimpleMKL[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2008, 9: 2491–2521.
- [35] GEBERT N, KRIEGER G, and MOREIRA A. Digital beamforming on receive: Techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 564–592. doi: [10.1109/TAES.2009.5089542](https://doi.org/10.1109/TAES.2009.5089542).
- [36] ROHLING H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1983, AES-19(4): 608–621. doi: [10.1109/TAES.1983.309350](https://doi.org/10.1109/TAES.1983.309350).

作者简介

陈 杰, 博士, 教授, 主要研究方向为高分辨率宽覆盖星载SAR成像探测机理、超高分辨率星载 SAR成像理论与方法、星载SAR电离层效应精细补偿等。

杨 威, 博士, 副教授, 主要研究方向为星载 SAR高分辨率雷达信号仿真与成像技术、新体制雷达技术。

王亚敏, 博士, 博士后, 主要研究方向为星载 SAR成像处理、运动目标检测和视频SAR处理等。

李春升, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为星载 SAR系统总体与仿真、多源遥感图像信息融合、信息获取与处理等。

(责任编辑: 高华)