

## 多角度SAR 动目标检测技术及其高分三号实验验证研究

申文杰<sup>①②③</sup> 韩冰<sup>①②③</sup> 林贇<sup>④</sup> 胡玉新<sup>①②③</sup> 洪文<sup>\*①②③</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

<sup>③</sup>(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

<sup>④</sup>(北方工业大学 北京 100144)

**摘要:** 多角度SAR作为一种新的SAR模式, 它具备对场景的长时间观测以及大合成孔径角两个优势。已有研究表明, 这两点区别于传统SAR模式的优势, 使得单通道系统也可以具备较强的动目标检测能力, 即, 无需增加雷达系统的复杂度, 就可以实现在轨星载SAR系统动目标检测能力的拓展和提升。这也使得多角度SAR动目标研究成为新的研究热点。在研讨近年来多角度SAR-GMTI研究基础及发展现状的基础上, 该文重点介绍了研究团队围绕高分3号开展的原理性验证实验研究, 包括凝视聚束模式动目标检测方法研究、双通道动目实验模式、双通道凝视聚束GMTI模式研究等。通过上述研究, 以期在轨及规划星载SAR单通道GMTI工程实现、未来星载多角度SAR时序动态观测新型工作模式设计等奠定可行性研究基础。

**关键词:** 多角度SAR; 地面动目标指示; 高分3号; 凝视聚束模式; 双通道实验模式

**中图分类号:** TN957

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-283X(2020)02-0304-17

**DOI:** 10.12000/JR20021

**引用格式:** 申文杰, 韩冰, 林贇, 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.

**Reference format:** 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.

## Multi-aspect SAR-GMTI and Experimental Research on Gaofen-3 SAR Modes

SHEN Wenjie<sup>①②③</sup> HAN Bing<sup>①②③</sup> LIN Yun<sup>④</sup> HU Yuxin<sup>①②③</sup> HONG Wen<sup>\*①②③</sup>

<sup>①</sup>(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>③</sup>(Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Beijing 100190, China)

<sup>④</sup>(North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** Multi-aspect SAR is a new SAR mode that has two advantages, *i.e.*, long-term observations and a large synthetic-aperture azimuth angle. Previous studies have reported that these unique advantages enable even single-channel systems to have a relatively strong capability for detecting moving targets, *i.e.*, multi-aspect SAR expands and improves the moving-target-related capabilities of the earlier SAR satellite system without increasing its complexity. As such, multi-aspect SAR-GMTI has become a trending topic for research. After reviewing the recent progress and research basis of multi-aspect SAR-GMTI, in this paper, we present our research on the Gaofen-3 SAR, which includes: moving-target detection methods that use the staring spotlight mode, dual-channels GMTI mode, and the dual-channel spotlight GMTI mode. With the results obtained by

收稿日期: 2020-03-20; 改回日期: 2020-04-23

\*通信作者: 洪文 whong@mail.ie.ac.cn \*Corresponding Author: HONG Wen, whong@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61571421, 61431018)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571421, 61431018)

责任主编: 杨建宇 Corresponding Editor: YANG Jianyu

this research, we hope to establish a basis for the engineering implementation of current and future spaceborne single-channel SAR-GMTI modes and the design of a future spaceborne multi-aspect SAR mode capable of retrieving time-series and dynamic scene information.

**Key words:** Multi-aspect SAR; Ground Moving Target Indication(GMTI); Gaofen-3; Staring spotlight mode; Dual channels mode

## 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术一经提出便得到了广泛地关注、发展和应用。近年来,随着新概念新体制的不断提出、雷达系统水平及其信号处理技术的发展,合成孔径雷达系统技术已从传统的高分宽幅逐步呈现出以多维度数据<sup>[1]</sup>获取、处理和应用的趋势,其中,SAR多角度观测因其适用于多平台非理想轨迹自适应成像、各向异性散射特征提取、全方位目标三维精细结构重建等方面的独特优势,成为多维度SAR中直接取得突破性进展并开展应用的维度之一。

与此同时,地面动目标指示(Ground Moving Target Indication, GMTI)作为常规SAR的重要模式之一,其检测性能主要依赖于多通道雷达硬件系统及其复杂信号与数据处理来实现。随着SAR多角度观测研究进展<sup>[2-4]</sup>、多角度SAR概念和体制的提出<sup>[5]</sup>,通过航迹控制、天线技术、信号处理、观测目标认知等技术的一体化,有望在现有平台航迹及雷达系统自身条件下(如星载SAR已经具备大至 $\pm 15^\circ$ 、机载近直线飞行大至 $\pm 45^\circ$ 等数据获取能力),利用多方位、长时间、序列数据的多角度观测及信号处理,使得运动目标检测、追踪、参数估计乃至高分辨重建都已成为可能。由此可以实现GMTI模式在单通道雷达系统上的功能拓展、多通道雷达系统上的性能提升。

在研讨近年来多角度SAR-GMTI研究基础及发展现状的基础上,本文重点介绍了研究团队围绕高分3号开展的原理性验证实验研究,包括凝视聚束模式动目标检测方法研究、双通道动目实验模式、双通道凝视聚束GMTI模式研究等。具体内容为:(1)针对单通道凝视聚束模式的动目标检测方法研究,旨在为未来单通道多角度SAR动目标检测做技术积累;(2)为了实现多角度与多通道模式优势互补,利用高分3号双通道动目标实验模式研究了主流的多通道算法;(3)利用高分3号完成凝视聚束模式下的双通道动目标实验。上述实验及结果研究尚未见公开报道。

## 2 多角度SAR-GMTI研究现状

传统窄波束SAR采用侧视观测几何来获得方

位-斜距二维图像。其存在两点问题,(1)地形起伏引起的叠掩、透视伸缩、阴影等现象;(2)有限的方位信息使得图像解译等应用受限。近年来,学者们以机载系统为对象,开始研究具备多角度观测能力的SAR模式。

圆迹SAR成像原理研究及飞行试验进展为SAR多角度观测提供了研究基础<sup>[2,6]</sup>。圆迹SAR模式通过载机平台的圆周曲线飞行轨迹、雷达波束的观测区域中心指向控制、以及独特的相干+非相干三维成像算法等,最大限度地实现了 $360^\circ$ 全方位观测<sup>[2,4,7]</sup>。随着研究的深入和应用的开展,多角度SAR及其数据获取方法被提出<sup>[5]</sup>,主要概念内涵包括单一平台近直线飞行条件下宽角相扫模式(如 $\pm 45^\circ$ )、离散多角度作业模式及多平台分布式节点协同作业模式等。与常规圆迹及曲线SAR不同,多角度SAR最大限度地放松了飞行平台对载荷数据获取与成像观测的约束,即具有常规飞行航迹下SAR多角度数据的获取、处理和提取的能力,为实际应用中机动平台的测绘和作业效率提供了有效保障。

多角度SAR具备下面几个优势:(1)大方位角带来更高分辨率;(2)丰富的方位信息有利于目标识别和分类;(3)多角度观测可以实现三维提取,且能有效减小、去除叠掩、阴影、透视伸缩等现象。由于上述优势,多角度SAR受到了国内外学者们关注,但是大合成孔径角、惯导精度等因素也对成像模型、数据处理方法等研究提出挑战。自90年代以来,学者们利用多角度数据(如 $\pm 45^\circ$ 聚束数据、圆周数据)对相关基础性问题进行了深入的研究,例如成像模型<sup>[7]</sup>、高分辨成像方法<sup>[8]</sup>、三维特征提取<sup>[9-12]</sup>、各向异性散射特征分析<sup>[13]</sup>等。典型的研究成果如图1所示。

随着研究的深入,多角度SAR在GMTI方面的特性开始受到关注。对于场景中的动目标,多角度SAR可以实现长时间观测,以及获得动目标的丰富方位信息。长时间观测特性有利于对目标的检测和持续追踪;丰富的方位信息有利于对动目标的速度进行估计。因此,多角度SAR-GMTI在近年来开始成为新的研究热点。虽然目前未见星载多角度SAR系统的公开报道,相关研究以机载系统为主,但是机载研究已初步证明了多角度SAR在GMTI方面的潜力。

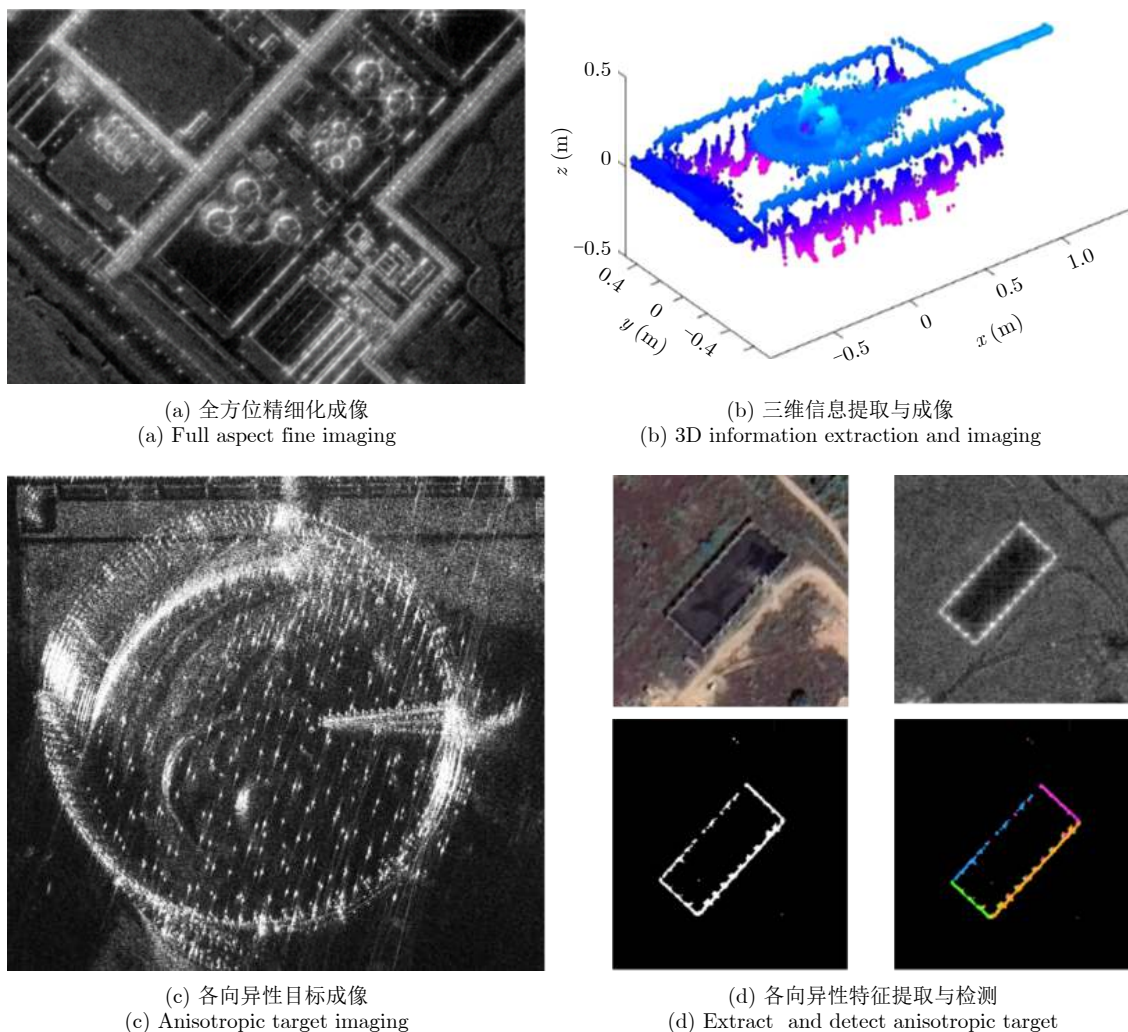


图1 典型多角度SAR研究

Fig. 1 Typical multi-aspect SAR research results

在早期,研究人员主要将多角度SAR作为获取长时间观测数据的手段,以支持传统的SAR-GMTI研究。而多角度SAR自身区别于传统SAR的特点并未得到重视和挖掘。其主要研究思路以多通道技术为主。2010年Bin Guo等<sup>[14]</sup>利用多角度SAR多通道数据研究了基线估计、通道幅相不平衡校正等问题,实现了子孔径图像的杂波抑制及动目标检测工作。2011~2014年, Ross Deming等学者<sup>[15-17]</sup>利用多角度SAR数据探讨了基础的偏置相位中心天线(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)、沿航迹干涉(Along Track Interferometry, ATI)、杂波干涉抑制(Clutter Suppression Interferometry, CSI)技术的性能。2011年,英国学者B. Barber等人<sup>[18]</sup>利用多角度SAR数据研究了非高斯环境下的空时自适应(Space-Time Adaptive Processing, STAP)最优权矢量估计问题。

从上述介绍可以发现,在早期阶段,多角度SAR模式仅作为获取数据的手段。关于多角度

SAR区别于SAR的新特性则研究较少,如信号模型分析等基础问题也未得到深入研究。

随着时间推移,研究人员开始关注挖掘多角度SAR自身特性来实现GMTI功能。2015年,法国空间局的Jean-Baptiste Poisson等学者<sup>[19]</sup>研究了单通道圆周孔径下的动目标速度估计及真实轨迹重建问题,并利用获取的X波段多角度SAR机载数据进行验证。该方法充分利用了多角度SAR丰富的方位信息作为速度估计问题的解决思路。首先构建动目标轨迹重建方程组,提取同一动目标在不同方位孔径图像中的坐标以及散焦参数,输入方程组求解得出动目标的真实坐标及运动速度。图2为该方法的处理结果示例,绿线为动目标在不同子孔径图像中的偏移位置,红线为动目标重建后的真实运动轨迹。可以看到红线与SAR图像中的道路走向吻合,验证了方法的有效性。

我国多家机构的团队也对多角度SAR-GMTI问题开展了研究。空天院研究团队对多角度SAR动

目标信号模型进行研究,提出了动目标显性轨迹(动目标在SAR图像中的信号形态)分析方法<sup>[20]</sup>。检测算法方面,课题组引入了光学领域的背景差分算法,并应用于多角度SAR<sup>[21]</sup>。该方法将动目标与静止场景进行分离,以实现动目标检测。之后,课题组对背景差分法进行持续改进,提出了适用于多角度SAR的对数背景差分算法<sup>[22]</sup>。检测示例结果如图3。

2019年,研究团队进一步实现了对数背景差分法向星载平台的迁移<sup>[23]</sup>。国内的国防科技大学研究团队针对多角度SAR动目标轨迹重建、动目标参数估计、动目标成像等问题也开展了工作<sup>[24-26]</sup>。

以上就是多角度SAR-GMTI发展概况的简要介绍。可以看到在近十年以来,学术界开始逐步转向挖掘多角度SAR-GMTI的自身特性和潜能。而且主要是以单通道系统、图像序列思路为主。在检测方面,如文献<sup>[22]</sup>中通过仿真与实际数据处理表明在单通道多角度SAR可以实现对杂波内距离向、方位向运动目标的检测。这是传统单通道SAR不具备的能力。测速方面,文献<sup>[19]</sup>也证明了多角度SAR可以实现动目标速度矢量的精确估计。因此可以认为,对现有的单通道系统,通过设计多角度模式可以拓展和提升其动目标检测能力。

本课题组在完成多角度SAR的信号模型分析、检测算法的设计之后,目前也在逐步考虑将多角度SAR与多通道算法相结合,以获得更强的GMTI性能。

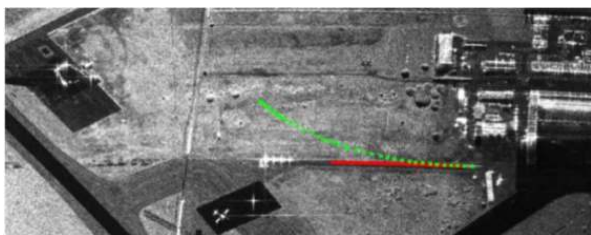


图2 法国空间局多角度SAR动目标轨迹重建研究  
Fig. 2 ONERA multi-aspect SAR moving target trajectory reconstruction

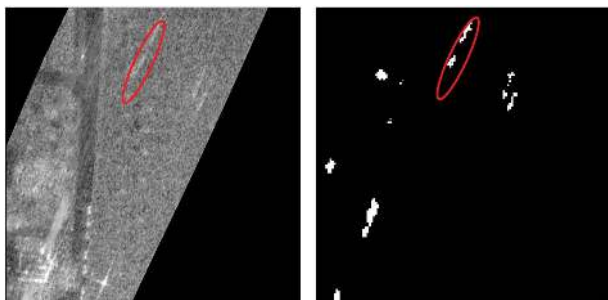


图3 对数背景差分法检测结果示例  
Fig. 3 Example detection result of logarithmic background subtraction

### 3 基于高分3号的多角度SAR-GMTI先导研究

相比于机载系统,星载系统可以实现更大的观测场景,同时其运动相对稳定,不受飞行员操作及天气的影响,因此具有更高的应用价值。为了获得大范围场景的动目标信息,各国机构通常会将机载SAR动目标研究成果逐步迁移到星载系统上。尽管已有在轨卫星的合成孔径短,并不具备多角度SAR模式。但是我们仍然可以利用已有卫星资源做一定的先导研究,为未来的星载多角度SAR-GMTI奠定技术基础。

因此,本节以国产高分3号SAR卫星为对象,围绕以下3点开展研究:

(1) 将对数背景差分检测算法进行适应性改进,以便迁移到星载平台。将对数背景差分法迁移到星载平台,可以提升和拓展未来单通道星载多角度SAR的动目标检测能力。实验数据采用的高分3号凝视聚束实验模式,以尽可能地获得大的方位合成孔径角。

(2) 介绍主流的多通道算法的处理流程,并在传统星载模式(仅有小合成孔径角)下进行应用。通过理论分析和实际数据处理,来充分展示多通道算法的优势及不足之处。数据采用的高分3号双通道动目标实验模式。这部分内容也是为多角度与多通道相结合奠定基础。

(3) 在回顾多通道算法的基础上,为了开展多角度与多通道算法进行优势互补的基础研究,介绍了团队开展的凝视聚束双通道动目标实验的研究进展。

#### 3.1 对数背景差分法在凝视聚束模式中的应用

##### 3.1.1 算法流程及其改进

在文献<sup>[22]</sup>中提出单通道多角度SAR动目标检测方法,对数背景差分法。该方法为图像序列方法,其思路较为简单。它主要是利用以下两个现象。(1)对于静止场景,其像素幅值在子孔径图像序列是缓慢变化。(2)对于动目标,其信号在图像序列中快速移动,当移动到静止场景中的某个像素时会引起高值。因此,可以利用图像序列生成背景图像(静止场景),然后通过差分实现地杂波抑制。文献<sup>[22]</sup>中的算法最初是面向机载多角度SAR情况,动目标的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)较高,所以在差分后通过恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测器即可实现动目标检测。然而,由于在星载情况下动目标SNR低,当直接应用该方法时,输出结果会有较高的虚警率。

因此,为了能够适应星载平台,文献<sup>[23]</sup>提出了改进算法以适应星载平台。具体而言,改进方法

采用3步检测方案来处理高虚警率问题。(1)第1步为CFAR检测器。不同点在于,此处采用了较低检测阈值,从而最大限度完整保留动目标信号。由于阈值较低,第1步检测中会包含较多虚警。(2)第2步是采用文献[23]中改进的DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)聚类算法来进一步去除虚警。CFAR处理结果为二值图,真实目标通常占据由相邻像素构成的连续区域,它具有较高的密度,而虚警通常为噪声和残余地杂波产生,其密度较低。因此,利用改进的DBSCAN聚类方法可以进一步减少虚警。(3)第3步是采用目标追踪算法来获得最终检测结果。其原理在于,动目标信号在图像序列中是连续运动的。而虚假目标主要包含两类,残留地杂波和噪声,残余地杂波通常静止不动,而噪声则是随机的。因此通过目标追踪算法可以获得最终检测结果。这里采用卡尔曼滤波法,因为该方法性能较为优越。除了检测方案的改进以外,由于高分3号数据产品通常以单视复图像(Single Look Complex, SLC)形式来提供,因此这里采用子孔径分割来获得图像序列作为检测素材。由于无需回波,这也进一步扩大了其应用范围。

除此以外,这里需要注意的是,高分3号凝视聚束模式仅有 $\pm 1.7^\circ$ 合成孔径角,仍然可以认为是近直线观测几何。该几何下,目标主要存在方位散焦,对应于子孔径图像序列,则是沿方位向的运动。因此提出的算法可以实现对方位运动目标的检测。

改进的对数背景差分法流程图如图4所示。该算法包括以下步骤:(1)将SLC图像进行子孔径处理,来生成重叠子孔径图像序列(为了减小散焦效

应对信杂比的影响,划分时应截取较小频谱得到低分辨率图像,具体见文献[23])。并将子孔径图像按照对应的方位照射角来排列。抑制斑点噪声并将图像序列转换为dB单位,以获得重叠子孔径对数图像(Overlap Subaperture Logarithm Image, OSLI)序列;(2)对OSLI序列进行辐射校正,以抑制天线照射不均匀的影响;(3)将中值滤波器应用于OSLI序列以生成背景图像;(4)使用辐射校正后的OSLI序列减去背景图像,获得前景图像序列;(5)在每幅图像上应用低阈值的基于高斯分布的双参数均值CFAR检测器以获得一组二进制图像结果;(6)应用改进的DBSCAN,去除虚警,同时得到潜在动目标聚类;(7)将聚类结果输入到目标追踪器中,去除残余虚警,并获得最终检测结果作为输出。

具体的操作步骤原理可见于文献[23],因此这里就不再做具体的说明。

### 3.1.2 实际数据处理

#### 3.1.2.1 高分3号数据介绍

高分3号是中国第1颗全极化C波段SAR卫星,于2016年在太原卫星发射中心成功发射<sup>[27]</sup>。该系统具有12种观测模式,其分辨率范围为1~500 m,幅宽对应为10~650 km。其天线类型为有源相控阵,可以在方位向控制波束指向,这也使其具备聚束观测能力。高分3号以滑动聚束为常规模式,其方位合成孔径角度较小。除此以外,还有凝视聚束实验模式,该模式可以提供更长的观察时间(即可以生成更多的子孔径图像),以及更大的合成孔径角度,所以这里选择凝视聚束模式的SLC图像作为数据集。

待处理的SLC图像于2017年采集自中国南京市。相关参数列于表1。由于全场景太大,这里选择SLC图像中的一个小区域作为实验对象。相应的SAR图像如图5所示。水平和垂直方向分别是方位和距离向。图中可以看到一个动目标信号,如蓝色框所示。目标的散焦轨迹沿方位向跨越430 m左右。为了显示动目标信号的运动,对该区域划分出4幅子孔径图像,如图5下部所示。从图中可以发现,该目标在图像中从右向左运动。本节实验通过对该动目标进行检测来验证方法。

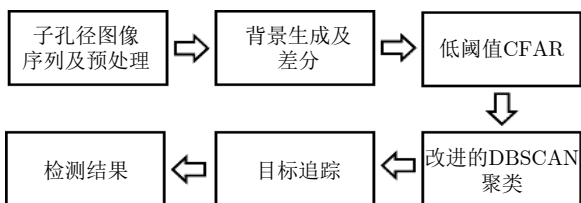


图 4 改进的对数背景差分法检测流程

Fig. 4 Flowchart of modified logarithm background subtraction

表 1 数据参数

Tab. 1 Dataset parameters

符号	参数	参数值	符号	参数	参数值
$\lambda$	波长	0.056 m	$R_c$	场景中心斜距	934.6 km
$V_s$	平台速度	7568 m/s	$T_a$	合成孔径时间	12.5 s
$\theta_L$	下视角	$33.7^\circ$	$\theta_a$	合成孔径角	$-1.78^\circ \sim 1.78^\circ$
$B_w$	带宽	240 MHz	$\Delta_r$	距离向像素尺寸	0.56 m
$f_{PRF}$	PRF	3742.7 Hz	$\Delta_a$	方位向像素尺寸	0.33 m

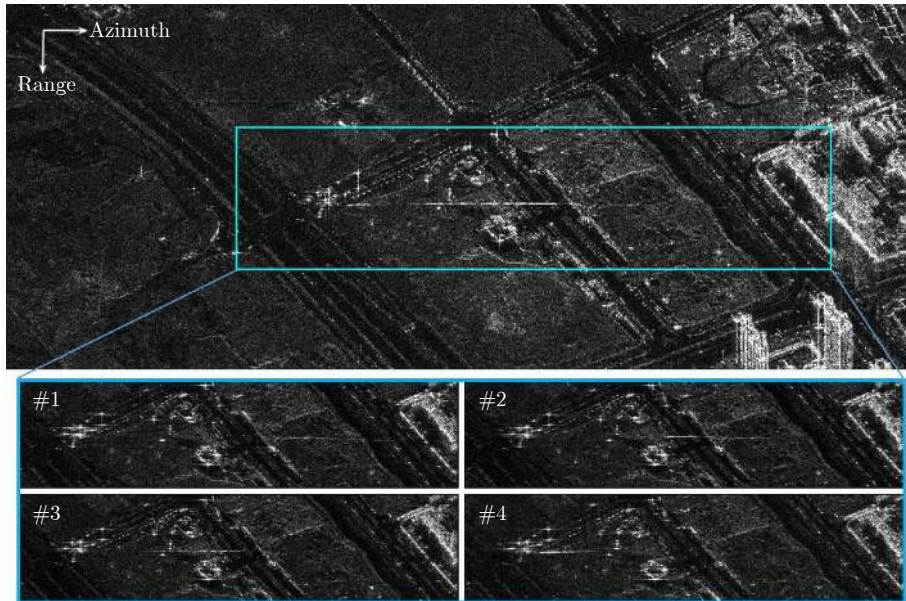


图5 所选小场景区域及相应子孔径图像序列

Fig. 5 Selected small scene and corresponding subaperture image sequence

### 3.1.2.2 数据处理结果

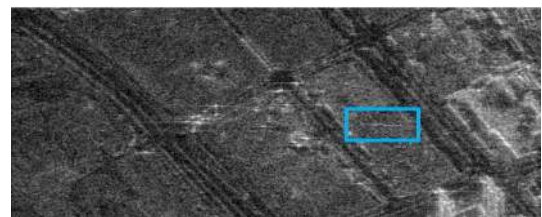
本小节给出所选高分3号小场景数据处理详细结果，来验证改进方法的有效性。

第1步是子孔径处理以生成重叠子孔径图像序列(OSLI)。由于星载SAR信号的信噪比SNR较低<sup>[28]</sup>，为了保证动目标信号不被强地杂波所掩盖，这里对方位谱切割采用较小带宽参数。具体而言，全孔径SAR图像对应方位向带宽为19379.69 Hz，切割后每个子孔径图像对应带宽为1495.4 Hz。因此，方位分辨率从0.33 m减小到4.25 m。为了获得重叠子孔径图像序列，图像间的带宽重叠率设置为90%，由此获得100幅图像组成的图像序列。然后，将各图像转换为dB单位，并应用5×5的均值滤波来减少相干斑噪声。按照方位观测角来进行排列，即可获得OSLI序列。

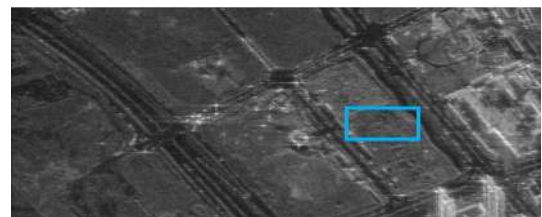
机载多角度SAR通常具有很大的方位合成孔径角，如圆轨迹可以达到360°。在此情况下，各向异性目标散射需要被考虑进来，否则算法性能会受到影响。因此需要将方位孔径进行分割，然后再生成OSLI序列。然而，高分3号凝视聚束模式的方位角观测角仅为3.56°，各向异性不明显，因此在下面的实验中将使用整个OSLI(包含100幅图像)。这里以第18幅图像为例，来说明每个步骤的处理结果。该子孔径图像如图6(a)所示。

接下来是对OSLI序列应用辐射校正，以去除天线照射不均匀的影响。根据文献<sup>[23]</sup>，获得的公共值为均值 $\mu_0=42$ 和标准差 $\sigma_0=7.09$ 。然后利用该参数调整OSLI中图像直方图统计特性。图7显示了第18和68幅图像在应用幅度归一化前和后的统计直

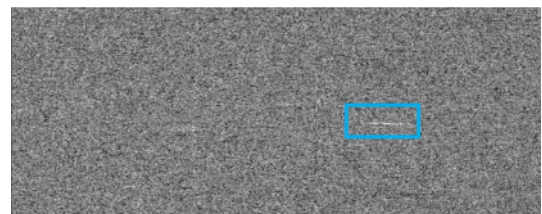
方图。图像中的红线和绿线表示均值和标准差。左侧是应用幅度归一化之前的两个图像的直方图。从子图来看，第18和第68幅图像的均值和标准差不相等，参数位置有明显偏差。应用校正方法后，相应



(a) 第18幅图像  
(a) The 18th image



(b) 背景图像  
(b) Background image



(c) 前景图像  
(c) Foreground image

图6 第18幅图像处理结果示例

Fig. 6 The results of 18th image

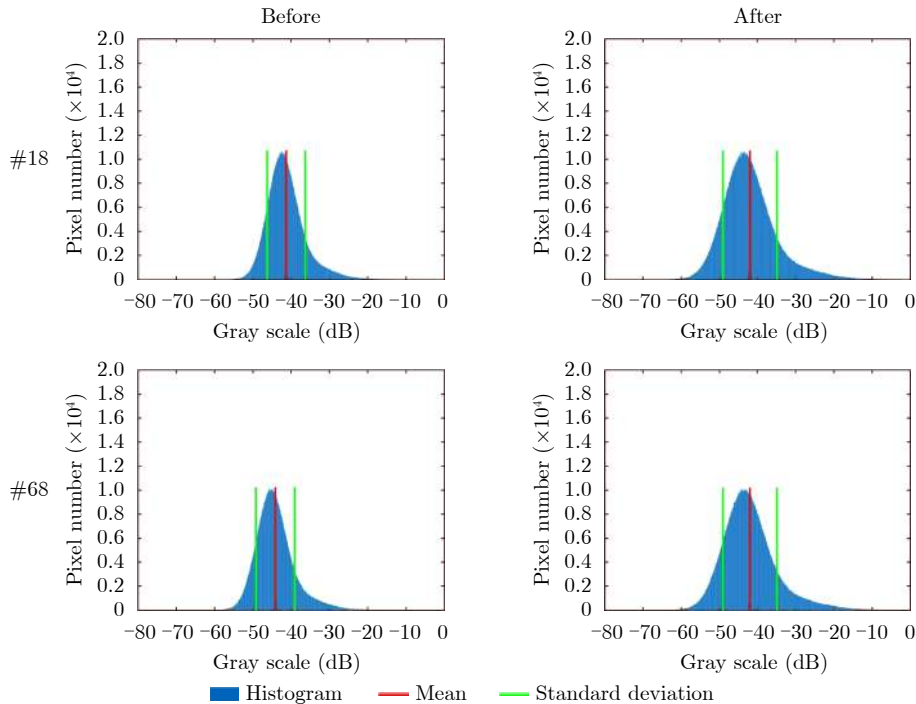


图7 应用幅度归一化前后的第18和68幅子孔径图像的直方图

Fig. 7 The histogram of 18th and 68th image before and after adjustment

结果如右侧中所示,可以发现均值与方差相等。将此过程应用于OSLI中的所有图像,然后即可使用调整后的OSLI生成相应的背景图像。

如前所述,实验将使用整个OSLI序列(100幅图像)进行操作。这里有两个原因。首先,与机载多角度SAR情况案例相比,高分3号的方位信息更少,各向异性特征不明显。另一个原因是,假如使用更多图像,则生成的背景图像将具有更好的质量,有利于获得较好的检测结果。生成的背景图像如图6(b)所示。比较图6(b)和图6(a),可以很明显的发现蓝色框中动目标在背景图像中被过滤,由此验证了背景生成步骤的有效性。

然后,通过差分操作即可抑制地杂波。对数背景减法算法包含变化检测中的对数算子,以实现良好的杂波抑制性能。从图6(c)所示的前景图像中,杂波(即静止场景)被很好地去除。可以看到,右侧建筑结构和左侧道路均被减去。子图6(c)清晰显示了动目标的信号,而前景图像中的其他区域则类似于均匀的随机噪声,这对于目标检测是非常有利的。

之后是CFAR检测器进行初检测。根据文献[22],这里采用高斯分布来作为前景图像的统计分布。前景图像的直方图如图8所示。红线是根据数据拟合的高斯分布,可以发现直方图与该分布匹配。图9显示了第18幅图像的CFAR检测结果。我们可以看到检测到目标的形状与前景图像中的信号形状相匹配。此外,二值化中还有非常多的误检测结果。观

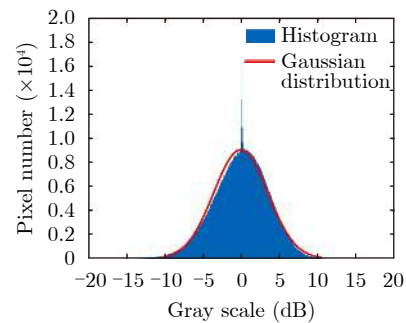


图8 图6(c)前景图像的直方图

Fig. 8 The histogram of image in Fig. 6(c)



图9 CFAR检测结果

Fig. 9 CFAR detection result

察图9,我们可以看到目标信号呈现出高密度,而其余虚假目标则占有较少的像素,其密度较低。这也为应用改进的DBSCAN方法提供了基础。

下一步是应用改进的DBSCAN算法来进一步去除虚警。第18幅图像的聚类结果如图10所示。使用每个聚类的最小边界框参数刻画矩形来标注每个

聚类。箭头指向的聚类是动目标信号。与图9中的CFAR结果相比，那些低密度虚假目标被去除。

经聚类处理后，最后一步就是通过目标追踪算法来获得最终结果。具体而言，将第1幅图片中的聚类数量和其对应的位置作为追踪的起始点来应用算法。然后使用后续图像的聚类结果进行迭代来更新跟踪结果。在第1幅聚类图像中获得10个聚类，因此有10条追踪轨迹被初始化，如图11(a)所示。其中蓝色箭头表示动目标信号，并利用最小边界框的参数来标注被追踪的聚类，其运动轨迹利用红线进行标注。

图11(b)为第18幅图像的目标跟踪结果。与图11(a)相比，此时只有2个聚类仍在被追踪。可以认为，第1幅图像中的8个虚假目标已经被排除。从图中可以发现，动目标信号的运动沿方位向进行运动。除动目标以外，还可以注意残余的一个虚假目标位于动目标的左下方。尽管经过追踪算法18次迭代，但可以发现其运动的轨迹非常短，几乎可以认为在该

区域静止不动。运行100次追踪迭代后，我们发现此聚类在第20次迭代后被排除。由于虚假目标是随机出现在图像中的，因此它们不会符合真实动目标信号的特征，无法被持续跟踪。本文将10个聚类在100次迭代的追踪过程中能够持续追踪的迭代次数与缺失次数进行统计，获得如图12所示的统计直方图。

蓝色和橙色分别对应于该聚类被有效追踪的迭代次数以及无法被跟踪的缺失迭代次数。其中第5个聚类为真实的动目标，可以发现其在100次迭代中都被持续追踪。其余聚类为虚假目标，在第20次迭代后均停止更新轨迹。本文收集10条轨迹的长度，并根据文献[23]来计算各聚类的等效方位速度，如表2所示。

由文献[23]中，目标方位向散焦长度 $L$ 与方位速度 $v_y$ 关系式为

$$L = 2v_y \cdot T_0 \tag{1}$$

其中， $T_0$ 为合成孔径时间。高分3号凝视聚束照射时间为12.5 s，设运动轨迹100 m为阈值时，对应等效方位速度为4 m/s。由此即可得到最终的检测结果只有第5个聚类，即动目标信号被保留，从而证明了改进的对数背景差分法的有效性。

最后，为了实现更好显示效果，将提取的追踪信息叠加在分辨率更高的子孔径图像上作为最终输出结果。跟踪结果如图13所示。红线表示运动轨迹，红框为动目标信号在当前图像中的最小边界框。

### 3.2 高分3号双通道动目标模式研究

本节对主流的多通道算法进行介绍。首先介绍了多通道的主要处理流程，通过流程图和实际数据



图 10 聚类结果  
Fig. 10 Clustering result



(a) 第1幅图  
(a) 1st image



(b) 第18幅图  
(b) 18th image

图 11 第1幅与第18幅图像追踪结果  
Fig. 11 Tracking results of 1st and 18th image

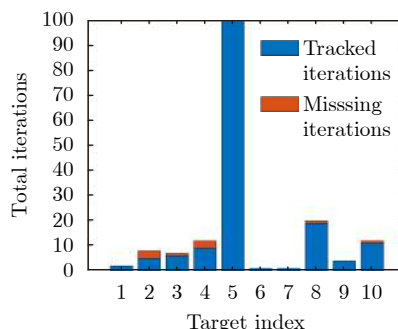


图 12 追踪结果的统计直方图  
Fig. 12 Statistics of tracking results

表 2 追踪结果

Tab. 2 Tracking results

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
运动距离(m)	12.8	35.6	37.4	36.6	417.8	11.2	21.9	22.1	27.6	31.6
方位速度(m/s)	0.5	1.4	1.5	1.5	16.7	0.4	0.9	0.9	1.1	1.3



处理给读者一个整体的认识。以期为后续多角度和多通道算法相结合奠定一定的基础。

### 3.2.1 多通道算法的主要处理流程

尽管多通道方法名目较多, 总体而言其主要处理流程存在一定的共性。因此这里对多通道算法共性的处理流程进行介绍。主要处理步骤流程图如图14所示。

首先是输入多通道数据, 对于数据类型可以是多种多样的。典型的有SAR图像、原始回波、非聚焦图像(多普勒波束锐化图像)、距离多普勒域数据等。通道数要求则至少为两通道。

其次是数据预处理步骤, 该步是至关重要的, 直接影响到算法后续步骤的效果。本步骤主要包含基线时移去除、通道间幅相误差校正。其中基线时移去除需根据算法的要求而定, 并非必须进行处理。对于典型的DPCA, ATI方法必须去除基线带来的时移相位, 对于STAP算法, 该相位则必须保留。实际处理中往往从数据中估计该相位, 并进行补偿。比较典型的去除方法有: (1) SAR图像插值及配准; (2) 去除不同通道的距离多普勒域信号干涉相位的线性项等。除时移相位以外, 还需要对通道间的幅相误差进行校正, 这一步通常对于各方法

都是必需的步骤。通道间的幅相误差主要是由系统在设计 and 制造期间造成的, 常用的处理方法有Ender提出的数字均衡方法<sup>[29]</sup>。数字均衡法在二维频域对数据进行操作, 可将幅相误差、基线时移一起去除, 因此对于DPCA等方法而言较为便利。当应用STAP时, 需要先估计时移相位, 再利用数字均衡去除幅相误差和基线时移, 最后再将时移相位补偿回数据当中。

第3步是杂波抑制, 该步是多通道检测的核心步骤。在预处理工作完成后, 多通道间数据都得到很好的配准。因此对于静止目标, 其幅度和相位可以认为是不变的, 经DPCA, STAP处理可以去除数据中的地杂波信号, 只保留下动目标信号。由于地杂波被去除, 相比于单通道算法, 可以同时检测杂波内和杂波外的动目标。这大大拓宽了动目标的检测范围, 极大地提升GMTI性能。由于ATI采用的是相位信息(共轭相乘), 理论上讲并不具备真正意义上的杂波抑制能力。所以杂波抑制主要由DPCA和STAP来实现。

第4步为检测和虚警抑制。在杂波抑制后, 往往存在残余地杂波影响, 因此需要CFAR检测器来检测动目标。检测器的类型是较为丰富的, 根据利用信息的不同, 可以粗略分为幅度信息检测、相位信息检测、幅度相位双参数检测。最后再利用如聚类类等后处理技术来进一步去除虚警, 即可获得检测结果。

第5步为在获得检测结果的基础上, 求解动目标的运动参数。这里主要用到的方法是ATI方法。动目标的距离向速度可以直接由干涉相位求出, 方位向运动通常利用匹配滤波器组来进行估计。最后利用距离向速度即可得到动目标的真实坐标。

最后是将检测结果及动目标信息在图片中进行标注, 输出GMTI结果。通常包含的信息有动目标的真实位置, 运动方向, 以及运动参数。

以上就是主要的处理流程。

### 3.2.2 实际数据处理

高分3号SAR系统的天线采用相控阵体制, 长15 m, 宽1.5 m。它可以在方位向分为两个子板进行接收。基于此项功能, 高分3号的观测模式中也设计了双通道GMTI实验模式。该模式下, 雷达处于条带正侧视情况, 利用整个天线进行发射, 两块子板进行接收<sup>[27]</sup>。

为了对前面介绍的流程进行验证, 选取了其中一景数据进行处理。该数据采集于2018年, 照射区域为广西省。数据格式为两通道的单视复图像, 其像素尺寸为1.12 m×2.59 m, 系统对应的有效基线

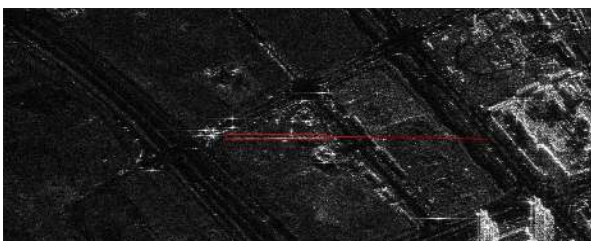


图 13 最终检测结果输出

Fig. 13 Final detection results



图 14 多通道算法主要处理流程

Fig. 14 Flowchart of multi-channel algorithm

为3.75 m。数据采集时的卫星速度为7569.5 m/s,综合基线等参数可以计算出最大可检测速度为28.26 m/s(101.7 km/h)。该参数也覆盖了大部分地面动目标的速度。两通道数据均为满采样,因而可以直接用于多通道SAR-GMTI处理。由于整景图像数据量大,且为了更好的显示效果,这里对其中一个子块进行处理。图15为选择的小子块区域的SAR图像,纵向为方位向,水平为距离向。

选择此场景的原因主要有以下几点。首先在图像中部可以看到一条很明显的高速路,即广昆高速。该道路走向沿距离向,因此动目标信号主要表现为偏移效应,且由于目标沿距离向运动,适合于多通道算法处理。其次,在该道路的上下方被山包围,没有密集的城市区域,因此可以保证大部分动目标都在该道路上。通过动目标信号是否可以重定位于该高速路上即可对算法的处理效果进行评估。

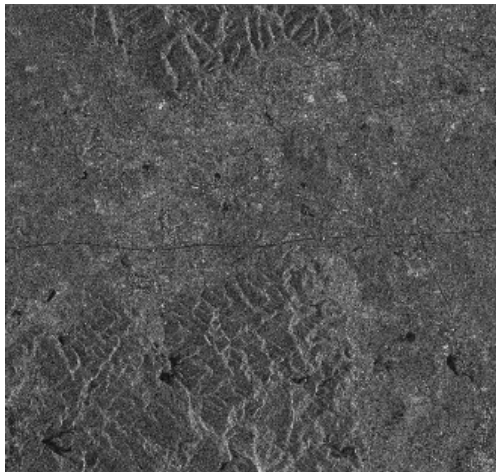


图 15 双通道SAR数据中选择的小场景区域  
Fig. 15 Selected small scene in SAR data

因为高分3号仅具备两个通道,所以处理方案选择如下:(1)利用DPCA+CFAR检测器实现动目标检测;(2)利用ATI对检测到的动目标完成测速工作。

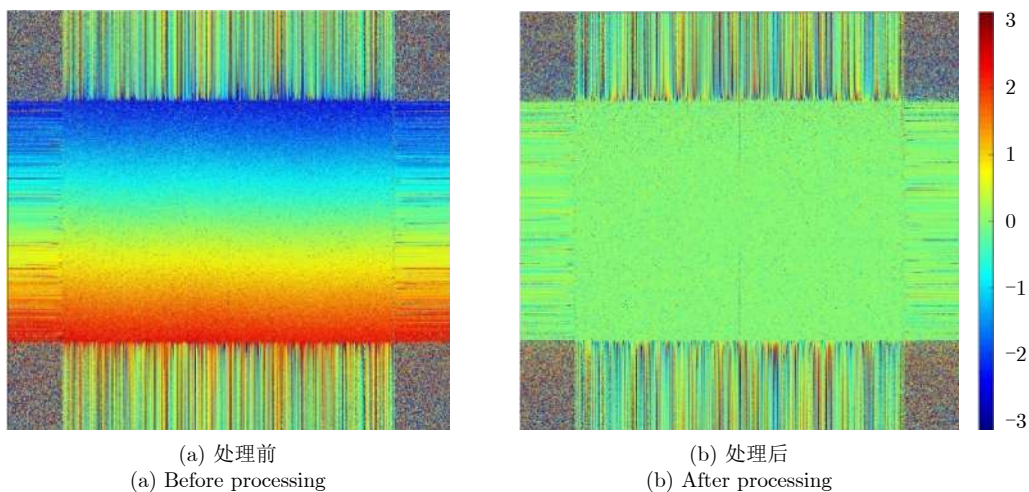
首先对两通道数据进行预处理,包括去除基线时延相位以及通道间的幅相误差校正。这里采用的方法是Ender提出的数字均衡方法。将通道1、通道2数据变换到二维频域,并且做干涉处理。得到二维频谱的干涉相位如图16(a)所示,

图16中水平和垂直方向分别对应于距离频率和方位频率轴。从图16(a)中可以清楚地看到,干涉相位沿方位向整体呈现出有规律的相位变化,即前述基线时延相位。应用数字均衡方法,得到预处理后的频谱干涉相位如图16(b)。可以看到,处理后该相位被去除,频谱的干涉相位位于零相位附近(绿色),达到了预处理步骤的预期效果。然后对两通道数据应用DPCA方法,得到杂波抑制后的DPCA图像如图17所示。

与原始SAR图像比较,可以发现整个场景中的山脉、建筑等地杂波都被很好地去除。同时可以发现许多动目标信号,分布于广昆高速所在位置的上下两侧。这也证明了距离向速度引起目标在方位向发生偏移的结论。

除动目标信号及噪声以外,读者可以看到图像中还有类似山脉走向的信号。这些信号经分析可能的来源是山脉背对照射方向形成的阴影区。这是因为DPCA是复信号进行差分,而阴影区域属于低散射区,相干斑随机噪声为主要信号源。因此无法实现强静止目标做差分的效果。

对DPCA图像应用CFAR检测器来检测动目标,即可得到如图18所示的二值化的检测结果,并



(a) 处理前  
(a) Before processing  
(b) 处理后  
(b) After processing

图 16 预处理前后两通道数据频谱的干涉图

Fig. 16 Interferograms of spectrum before and after preprocessing

用红圈标注动目标。由于目标信号仅占几个像素，相对于整个场景太小，因此为了更好的显示效果，将其中一个动目标检测结果进行局部放大。对应于下方箭头所指的白色框区域。

在获得二值化的检测结果后，即可对动目标进行速度估计。将预处理后的数据共轭相乘并提取相位信息，获得的ATI干涉相位如图19所示。

与图18类似，这里对动目标信号利用红圈进行标注，同时对下方同一动目标进行放大显示。可以发现图像中整个静止场景都在零相位附近，相位噪声主要由相干斑随机噪声引起。仔细观察可以发现，在图中可以看到广昆高速。这是因为道路属于低散射区，因此相干斑噪声产生了随机的干涉相位，不在零附近。由此可以看到广昆高速的形状。放大图片对应于下方的一个动目标，动目标由黑色椭圆标注。可以看到该目标的相位相对于背景并不为零，且整个目标所占像素的相位都呈现出相近的

相位值。利用该相位即可获得动目标的距离向速度，通常需要对动目标信号的所有像素值做平均来估计干涉相位。这样的好处是可以减小随机相位噪声的影响。

利用前面得到的二值化检测结果提取每个动目标的干涉相位，由此计算动目标的距离向速度值。在此基础上即可得到动目标的真实坐标，结合速度的符号可以得到其运动的方向。将上述信息在SAR图像中进行标注，得到输出的GMTI最终结果，如图20所示。

图中动目标运动方向由颜色和三角箭头指向表示，三角位置为真实坐标。可以看到动目标基本都被重定位回广昆高速上，由此验证了多通道方法的有效性。

### 3.3 高分3号双通道凝视聚束模式研究

由3.2小节可得，多角度模式和多通道方法结合可以实现优势互补。首先，双通道可以为多角度SAR提供更强的杂波抑制功能。其次，由于多通道技术对动目标径向速度敏感，因此从多角度观察可

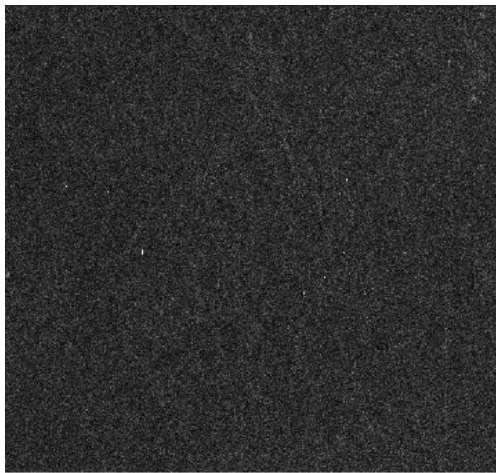


图 17 DPCA结果  
Fig. 17 DPCA results

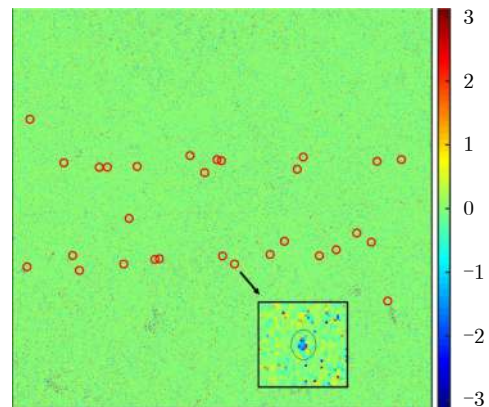


图 19 ATI干涉相位图  
Fig. 19 ATI phase map

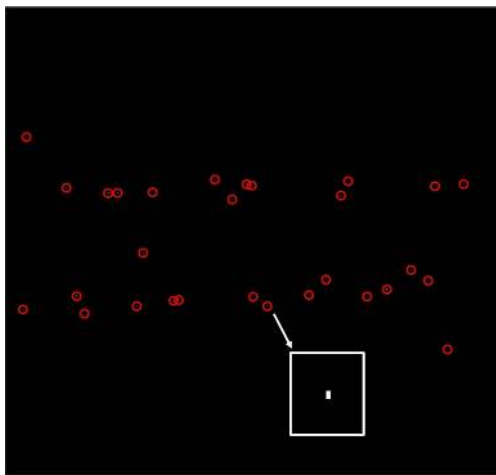


图 18 CFAR结果  
Fig. 18 CFAR results

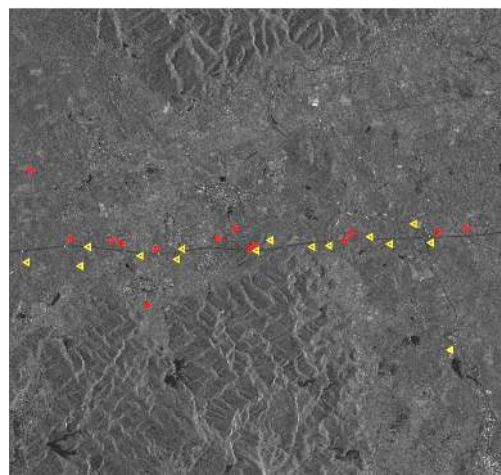


图 20 GMTI输出结果  
Fig. 20 GMTI result

以提高检测性能。第三,多角度SAR的高分辨率特性使获得分米级动目标聚焦图像成为可能,这对目标识别极为有利。

基于这些优点,课题组与航天五院开展了模式论证和数据获取工作。按照计划,在进行含有合作动目标的正式实验之前,首先要进行非合作目标的实验,以评估模式设计参数和数据,为正式实验做准备。第1批非合作数据于2019年6月获得,正式实验已于2019年11月份开展。由于正式实验数据仍在处理中,这里主要针对第1次非合作实验进行介绍。

首次实验于2019年6月在北京怀柔区进行。主要参数如表3所示。

这里有几点需要注意。高分3号的凝视聚束模式方位观测角为 $3.4^\circ$ ,相应照射时间约15 s。与条带双通道模式(照射时间1 s)相比,这是一个相对较长的时间,足以记录目标较为复杂的运动。

该区域的光学图像如图21所示。水平为距离向,垂直方向是方位向。从该图可以看到有多条道路,包括高速公路和铁路。这些道路可以提供足够数量的动目标。此外,根据道路方向,可以保证获得距

表3 实验参数

Tab. 3 Experiment parameters

实验参数	参数值
中心频率 $f_c$	5.4 GHz
带宽 $B_d$	100 MHz
PRF	1948 Hz
场景中心斜距 $r_c$	974347 m
入射角 $\theta_{inc}$	$34.5^\circ$
平台速度 $v_s$	7566 m/s
轨道类型	Descending
方位观测角 $\theta_{azi}$	$-1.7^\circ \sim 1.7^\circ$
合成孔径时间 $T$	15 s

离向运动目标和方位向运动目标。左边是市区,可以看到很多建筑物。右边是农田。该场景相应的SAR图像如图22所示。可以看到图中红圈标注的道路围成的三角形特征与光学图片中的特征一致。

SAR图像是通过BP算法生成,因为该方法较为灵活,且可以生成同一网格下子孔径图像。可以发现,SAR图像中的场景与光学图像场景一致,如



图 21 照射场景光学图片

Fig. 21 Optical image of scene



图 22 照射场景全孔径SAR图像

Fig. 22 Full aperture image of the scene

左侧的市区和中部区域的多条道路。读者还可以注意到,在图像的底部和上方区域存在模糊信号。这是因为第1次实验中设置的PRF不够高,导致静止场景的模糊能量混了进来。在下面的处理中,选取无模糊的部分进行幅相校正后即可应用DPCA,ATI方法。

### 3.3.1 数据预处理

由于高分3号为两通道数据,所以采用两通道DPCA和ATI方法进行处理。对于这两种技术,如3.2.1节中介绍的,需要去除基线引起的时移相位,同时补偿通道间的幅相误差。而较为通用的方法是Ender<sup>[29]</sup>提出的数字均衡方法。与上一节中类似,我们将数字均衡法应用于两个通道生成的复图像,但是处理结果发现该方法无法有效实现时移相位去除。两通道图像在处理前后的干涉相位图如图23所示,子图23(a)为处理前的结果,图23(b)为处理后的结果。

在图23(a)中可以看到沿方位向的线性相位。经处理后的图23(b)中,可以看到图像中部的相位约为零(绿色颜色),但是沿方位向仍然存在一定的线性相位。这与我们的预期结果不相符。经分析,产生这样的结果的原因如下。由于高分3号的相控阵天线在聚束模式下是离散扫描的,即每经过固定脉冲数量(Stationary Number of Pulses, SNP)后,波束的方位指向转动 $0.01^\circ$ 。然而,不同的波束指

向(或不同的SNP下),通道间的幅相误差也不同,此误差是时变的。当利用SAR图像作为输入时,累计的误差就导致产生了不理想的处理结果,引起性能下降。解决此问题的方法是在回波域中对每一组SNP信号分别应用数字均衡方法进行误差校正和基线相位去除。本文对第1组SNP信号应用数字均衡法,得到处理前后的干涉相位图像如图24所示。

从图24可以看到在校正后,线性相位与相位误差被消除,回波的干涉相位集中在零相位(绿色颜色)。为了进一步说明不同SNP之间相位误差的差异,本文提取了第1组和第11组SNP的补偿相位。为了抑制相位噪声,对信号沿距离向进行了平均,得到补偿相位如图25所示。横轴为多普勒,纵轴为干涉相位。可以看到二者都包含一个线性项,但是二者的相位曲线也有明显的差异,由此证明了相位误差的时变性。

纠正每组SNP的相位误差后,两个通道的数据就被配准,在成像后即可应用DPCA和ATI方法。

### 3.3.2 数据初步结果

ATI使用通道1图像乘以复共轭通道2图像。由于两个通道已得到配准,因此静止杂波具有零相位,动目标由于自身运动具有非零相位,利用该相位可以实现径向速度估计。DPCA方法将复图像相减来抑制地杂波。然后即可利用CFAR检测器检测动目标。凝视聚束模式观测时间长,图像分辨率

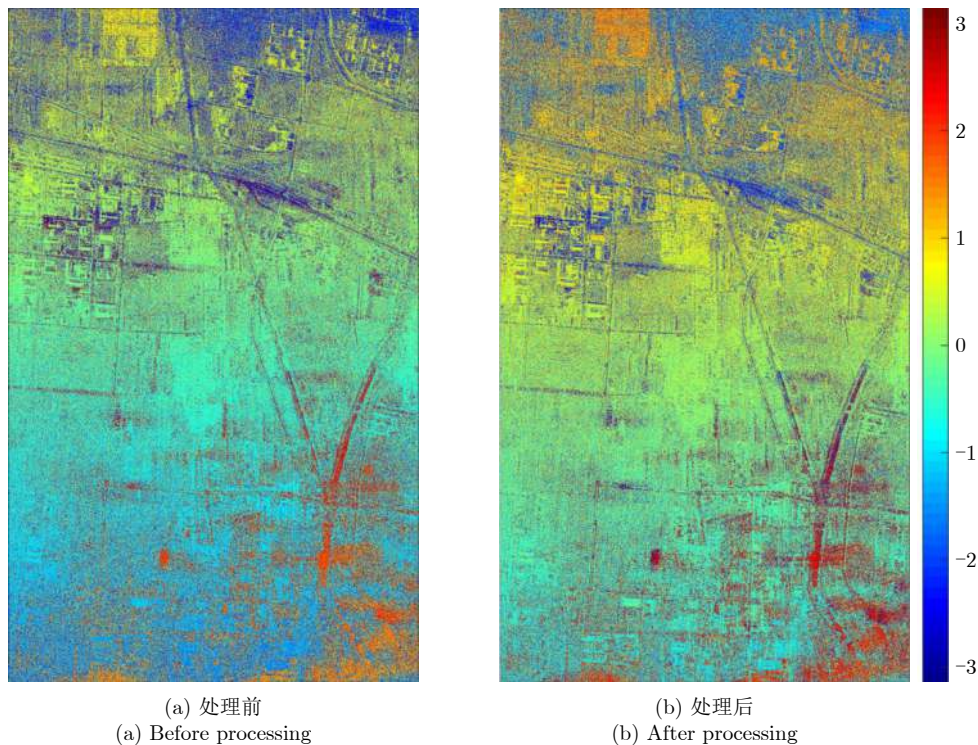


图 23 校正前后干涉相位图

Fig. 23 ATI phase maps before and after correction

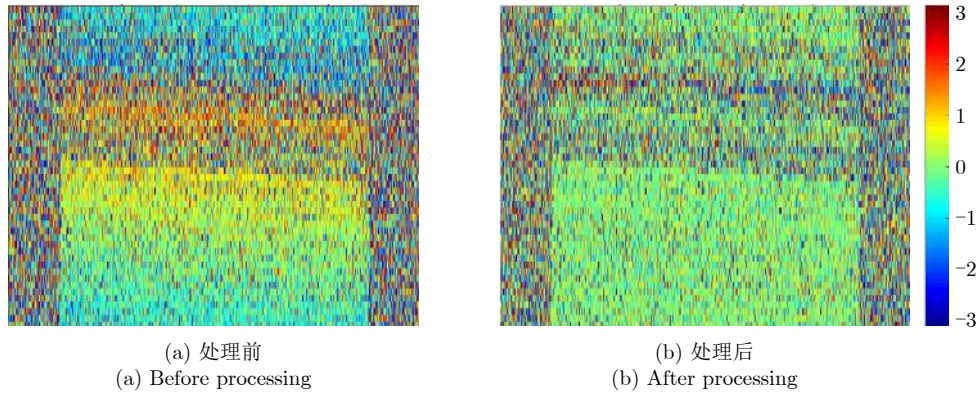


图 24 第1组SNP信号校正前后干涉相位图

Fig. 24 ATI phase map of 1st SNP signal before and after correction

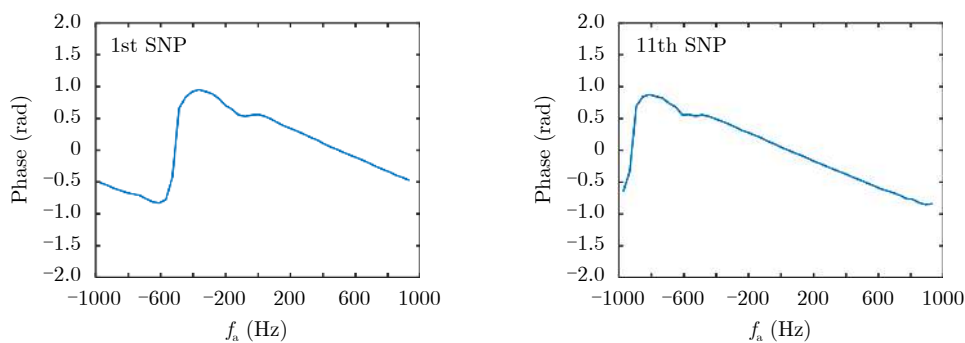


图 25 第1组和第11组SNP补偿相位曲线

Fig. 25 Compensated phase of 1st and 11th SNP signal

高, 如果使用全孔径SAR图像, 则目标的距离走动效应会很严重。因此, 这里对子孔径图像执行ATI和DPCA。

ATI的结果如图26所示。可以看到, 该图像的大部分区域为绿色(零相位), 与预期相符。在左上方区域看到一个非零相位的区域。该区域对应为建筑物产生的阴影, 因此主要为相干斑噪声信号为主, 表现为非零相位。左下角非零相位是潜在动目标信号。

然后应用DPCA技术, 结果如图27所示。对比左侧的原始SAR图像, 从图中可以看到大部分地杂波被消除了。而需要潜在动目标信号被保留下来。由此可以利用CFAR算法进行目标检测。

上述处理结果也初步证明双通道方法在凝视聚束双通道数据上的有效性, 为后续深入研究奠定了基础。

#### 4 结论与展望

本文详细讨论了近年来多角度SAR-GMTI的发展现状。重点介绍了研究团队围绕高分3号开展的研究。具体包含以下3点内容。(1)将提出的对数背景差分检测算法迁移到高分3号单通道凝视聚束

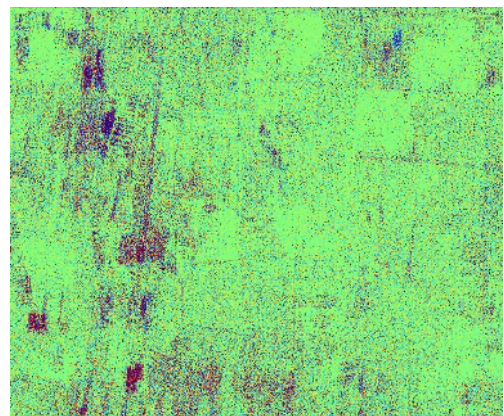


图 26 ATI处理结果

Fig. 26 ATI result

模式。针对星载SAR动目标信噪比较低, 引起的检测虚警高的问题, 进行了算法改进。设计了3步检测方案, 并以实际数据进行验证。(2)为实现多角度与多通道方法优势互补, 回顾了主流的多通道算法。介绍了多通道方法的共性处理流程, 然后处理了高分3号双通道动目标数据。(3)在了解多通道方法的基础上, 进一步介绍了双通道凝视聚束SAR动目标实验的先导性研究。

未来的研究方向还包括在连续多角度数据的研

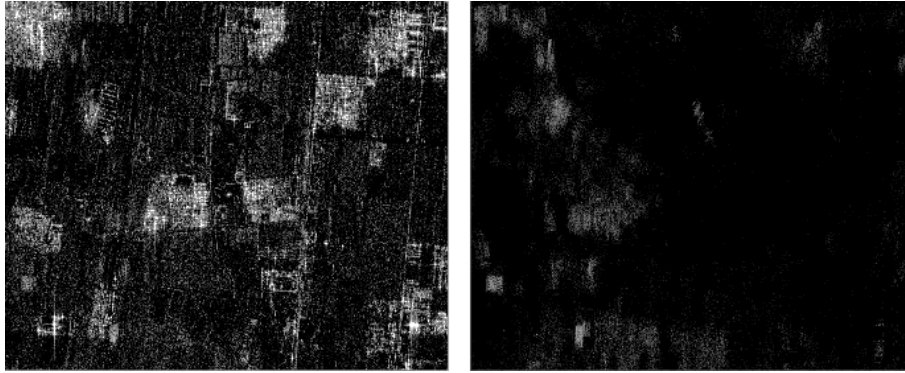


图 27 原始SAR图像与DPCA处理结果

Fig. 27 Original SAR image and DPCA result

究基础上,实现离散多角度数据的综合利用。在实际应用中,往往存在获取离散多个角度的数据,如卫星平台、大机动平台仅有可能在特定的几个方位角度上获取数据。因此,通过对连续的多角度数据的研究,以期在实际应用中的离散化多角度数据的综合利用提供支撑。

上述研究实现了单通道雷达系统运动目标检测功能拓展、多通道雷达系统运动目标检测性能提升的原理性验证。同时,也为在轨及规划星载SAR单通道GMTI工程实现、未来星载多角度SAR时序动态观测新型工作模式设计等奠定可行性研究基础。

**致谢** 感谢中国科学院空天信息创新研究院微波成像技术国家级重点实验室、航天微波遥感系统部提供了SAR多角度观测数据。感谢中国空间技术研究院在高分3号双通道凝视聚束实验模式数据获取方面的帮助。感谢主审及多位匿名专家在论文评审过程中提出的宝贵意见和建议。

### 参 考 文 献

- [1] 吴一戎. 多维度合成孔径雷达成像概念[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 135-142. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.13047](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.13047).  
WU Yirong. Concept of multidimensional space joint-observation SAR[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 135-142. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.13047](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.13047).
- [2] 洪文. 圆迹SAR成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 124-135. doi: [10.3724/SP.J.1300.2012.20046](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20046).  
HONG Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 124-135. doi: [10.3724/SP.J.1300.2012.20046](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20046).
- [3] 洪文, 林赞, 谭维贤, 等. 地球同步轨道圆迹SAR研究[J]. 雷达学报, 2015, 4(3): 241-253. doi: [10.12000/JR15062](https://doi.org/10.12000/JR15062).  
HONG Wen, LIN Yun, TAN Weixian, *et al.* Study on geosynchronous circular SAR[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(3): 241-253. doi: [10.12000/JR15062](https://doi.org/10.12000/JR15062).
- [4] 洪文, 王彦平, 林赞, 等. 新体制SAR三维成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(6): 633-654. doi: [10.12000/JR18109](https://doi.org/10.12000/JR18109).  
HONG Wen, WANG Yanping, LIN Yun, *et al.* Research progress on three-dimensional SAR imaging techniques[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(6): 633-654. doi: [10.12000/JR18109](https://doi.org/10.12000/JR18109).
- [5] 王彦平, 韩阔业, 洪文, 等. 多角度合成孔径雷达数据获取的方法[P]. 中国, CN201410217041.6, 2014.  
WANG Yanping, HAN Kuoye, HONG Wen, *et al.* Multi-angle synthetic aperture radar data acquisition method[P]. CN, CN201410217041.6, 2014.
- [6] SOUMEKH M. Reconnaissance with slant plane circular SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(8): 1252-1265. doi: [10.1109/83.506760](https://doi.org/10.1109/83.506760).
- [7] 林赞, 谭维贤, 洪文, 等. 圆迹SAR极坐标格式算法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2802-2807. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.0003](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.0003).  
LIN Yun, TAN Weixian, HONG Wen, *et al.* Polar format algorithm for circular synthetic aperture radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2802-2807. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.0003](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.0003).
- [8] 林赞. 圆迹合成孔径雷达成像算法研究[D]. [博士学位], 中国科学院电子学研究所, 2011.  
LIN Yun. Research on circular synthetic aperture radar imaging algorithm[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electrics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [9] LIN Yun, HONG Wen, TAN Weixian, *et al.* Interferometric circular SAR method for three-dimensional imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1026-1030. doi: [10.1109/LGRS.2011.2150732](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2150732).
- [10] HONG Wen, WANG Yanping, TAN Weixian, *et al.* Tomographic SAR and circular SAR experiments in anechoic chamber[C]. The 7th European Conference on

- Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, 2008: 1–4.
- [11] ORIOT H and CANTALLOUBE H. Circular SAR imagery for urban remote sensing[C]. The 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, 2008: 1–4.
- [12] 刘燕, 谭维贤, 林赟, 等. 基于圆迹SAR的建筑物轮廓信息提取[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 946–952. doi: [10.11999/JEIT140717](https://doi.org/10.11999/JEIT140717).
- LIU Yan, TAN Weixian, LIN Yun, *et al.* An approach of the outlines extraction of building footprints from the circular SAR data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 946–952. doi: [10.11999/JEIT140717](https://doi.org/10.11999/JEIT140717).
- [13] ZHAO Yue, LIN Yun, HONG Wen, *et al.* Adaptive imaging of anisotropic target based on circular-SAR[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(16): 1406–1408. doi: [10.1049/el.2016.1764](https://doi.org/10.1049/el.2016.1764).
- [14] GUO Bin, VU D, XU Luzhou, *et al.* Ground moving target indication via multichannel airborne SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3753–3764. doi: [10.1109/TGRS.2011.2143420](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2143420).
- [15] DEMING R W. Along-track interferometry for simultaneous SAR and GMTI: Application to Gotcha challenge data[C]. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVIII, Orlando, United States, 2011: 80510P.
- [16] DEMING R W, MACINTOSH S, and BEST M. Three-channel processing for improved geo-location performance in SAR-based GMTI interferometry[C]. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIX, Baltimore, United States, 2012: 83940F.
- [17] DEMING R, BEST M, FARRELL S. Simultaneous SAR and GMTI using ATI/DPCA[C]. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XXI, Baltimore, United States, 2014: 90930U.
- [18] BARBER B and BARKER J. Indication of slowly moving ground targets in non-Gaussian clutter using multi-channel synthetic aperture radar[J]. *IET Signal Processing*, 2012, 6(5): 424–434. doi: [10.1049/iet-spr.2011.0157](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2011.0157).
- [19] POISSON I P, ORIOT H M, and TUPIN. Ground moving target trajectory reconstruction in single-channel circular SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 1976–1984. doi: [10.1109/TGRS.2014.2351419](https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2351419).
- [20] SHEN Wenjie, LIN Yun, CHEN Shiqiang, *et al.* Apparent trace analysis of moving target with linear motion in circular SAR imagery[C]. The 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2018: 1–4.
- [21] 洪文, 申文杰, 林赟, 等. 基于背景差分法的单通道圆迹SAR动目标检测算法研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(9): 2182–2189. doi: [10.11999/JEIT161300](https://doi.org/10.11999/JEIT161300).
- HONG Wen, SHEN Wenjie, LIN Yun, *et al.* Single channel circular SAR moving targets detection based on background subtraction algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(9): 2182–2189. doi: [10.11999/JEIT161300](https://doi.org/10.11999/JEIT161300).
- [22] SHEN Wenjie, LIN Yun, YU Lingjuan, *et al.* Single channel circular SAR moving target detection based on logarithm background subtraction algorithm[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 742. doi: [10.3390/rs10050742](https://doi.org/10.3390/rs10050742).
- [23] SHEN Wenjie, HONG Wen, HAN Bing, *et al.* Moving target detection with modified logarithm background subtraction and its application to the GF-3 spotlight mode[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1190. doi: [10.3390/rs11101190](https://doi.org/10.3390/rs11101190).
- [24] WANG Wu, AN Daoxiang, LUO Yuxiao, *et al.* The fundamental trajectory reconstruction results of ground moving target from single-channel CSAR geometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(10): 5647–5657.
- [25] LI Jianpeng, AN Daoxiang, WANG Wu, *et al.* A novel method for single-channel CSAR ground moving target imaging[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(19): 8642–8649. doi: [10.1109/JSEN.2019.2912863](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2912863).
- [26] AN Daoxiang, WANG Wu, and ZHOU Zhimin. Refocusing of ground moving target in circular synthetic aperture radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(19): 8668–8674. doi: [10.1109/JSEN.2019.2922649](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2922649).
- [27] SUN Jili, YU Weidong, and DENG Yunkai. The SAR payload design and performance for the GF-3 mission[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2419. doi: [10.3390/s17102419](https://doi.org/10.3390/s17102419).
- [28] 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).
- [29] ENDER J H G. Space-time adaptive processing for synthetic aperture radar[C]. IEE Colloquium on Space-Time Adaptive Processing, London, UK, 1998: 611–618.



## 作者简介



申文杰(1991-), 男, 山西人, 博士研究生。2017年于中国科学院电子学研究所获硕士学位, 目前在中国科学院空天信息创新研究院攻读博士学位。主要研究方向为圆周SAR-GMTI, 多通道SAR-GMTI。  
E-mail: Shenwenjie14@mails.ucas.ac.cn



韩冰(1980-), 女, 副研究员。2008年于中国科学院电子学研究所获博士学位。现为中科院空天信息创新研究院副研究员, 硕士生导师。主要研究方向为高分辨率合成孔径雷达成像、运动补偿及其相关信号处理技术。  
E-mail: han\_bing@mail.ie.ac.cn



林贲(1983-), 女, 浙江人, 副教授。2011年于中国科学院电子学研究所获博士学位。现为北方工业大学副教授, 硕士生导师。主要研究方向为合成孔径雷达三维成像技术、多角度SAR像基础理论与方法研究。  
E-mail: ylin@ncut.edu.cn



胡玉新(1981-), 男, 副研究员。中国科学院电子学研究所获博士学位, 现为中国科学院空天信息创新研究院副研究员, 硕士生导师。主要研究方向为星载SAR信号处理, 遥感卫星地面系统、空间信息处理系统体系架构。  
E-mail: yxhu@mail.ie.ac.cn



洪文(1968-), 女, 研究员。研究经历包括北京航空航天大学电子工程系副教授、德国宇航院雷达与微波技术所客座研究员、中国科学院电子学研究所研究员, 现为中国科学院空天信息创新研究院研究员, 博士生导师。主要研究方向为多角度SAR数据处理方法、微波成像新概念新体制新方法等。  
E-mail: whong@mail.ie.ac.cn