一种基于 SAR 稀疏采样数据的动目标运动参数估计方法

陈一畅^{*①2} 张 群^{①3} ^①(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077) ^②(清华大学电子工程系 北京 100084) ³(复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室 上海 200433)

摘 要: 该文针对地面动目标运动参数估计问题进行研究,提出一种利用单天线合成孔径雷达(SAR)稀疏采样数据 的动目标 2 维速度估计方法。首先以目标 2 维速度为参数构建一个等效参数化模型将动目标回波数据转化为小斜视 回波数据,然后利用改进的迭代阈值算法实现不同参数条件下的动目标 2 维成像,最后以成像结果的图像熵值为优 化准则对初始模型参数进行搜索,从而获得准确的动目标运动参数。该方法以稀疏采样数据为输入,可以减少所需 数据量,并且能够有效避免多普勒模糊问题,在较低信杂比条件下仍然能够准确估计出目标运动参数。仿真实验结 果验证了所提动目标参数估计方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达;参数化模型;运动目标;参数估计
 中图分类号: TN957.51
 文献标识码: A
 DOI: 10.11999/JEIT160922

文章编号: 1009-5896(2016)12-3049-07

Parameter Estimation Method of Moving Targets with SAR Sparse Sampling Data

⁽¹⁾(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

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

⁽³⁾(Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: To solve the problem of motion parameter estimation of ground moving target, a parameter estimation method of moving targets with sparse sampling data of single SAR sensor is proposed. First, based on the 2 dimensional velocity of moving targets, an equivalent parametric model is constructed to transform the moving target echo into squint SAR echo. Then, with different parameters the modified iterative thresholding algorithm is applied to achieving imagery of moving target. Finally, the motion parameters of targets are obtained by minimizing the image entropy. It is shown that, using the proposed method, the required echo sampling can be reduced, the Doppler ambiguity problem can be avoided and accurate velocity estimation can be obtained even in low signal-to-clutter ration scenarios. Simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: SAR; Parametric model; Moving target; Parameter estimation

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种装载在航空航天平 台,具备对地全天候、全天时成像能力的微波遥感 设备^[1]。其中对地面动目标运动参数估计是 SAR 的 一项重要应用,准确的运动参数估计对于动目标检 测、成像、识别都有着重要作用。传统的动目标运 动参数估计方法大多是基于 Doppler 相位分析,通

基金项目: 国家自然科学基金(61631019, 61471386)

过估计出回波信号的 Doppler 频偏和 Doppler 调频 率,从而计算出动目标在距离向和方位向的 2 维速 度参数^[2,3]。但是这一类方法存在固有缺陷,当 SAR 以一定的脉冲重复频率(PRF)在方位向采样时,只 可对区间 [-PRF/2,PRF/2)内的 Doppler 频谱进行 分析,而当目标运动速度较快时,可能使得 Doppler 频偏超出此区间,即 Doppler 模糊,最终使得目标 速度估计存在较大误差。解决 Doppler 模糊问题最 简单直接的办法是增大 PRF,但是同时又会引入缩 短模糊距离、增加数据量等新问题。许多文献基于 多通道 SAR 系统提出了有效的动目标速度估计方 法,以及动目标成像算法^[4,5],然而,需要指出的是

收稿日期:2016-09-12;改回日期:2016-11-11;网络出版:2016-12-13 *通信作者:陈一畅 cyc_2007@163.com

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61631019, 61471386)

多通道解决 Doppler 模糊问题的同时也增加了硬件 复杂度。也有文献针对单天线 SAR 数据,提出了动 目标参数估计方法,如文献[6],将动目标信号做距 离徙动矫正(Range Cell Migration Correction, RCMC)和距离压缩操作,然后以距离多普勒域的图 像对比度最大化为准则,对目标的2维速度进行搜 索。因为 RCMC 和距离压缩操作与目标速度密切相 关,所以只有根据准确的目标运动参数对信号进行 RCMC和距离压缩才能使距离多普勒图像的对比度 最大化。文献[6]的方法可以有效克服 Doppler 模糊, 但对信杂比有较高的要求。文献[7]利用 Radon 变换 估计目标径向速度,避免了 Doppler 模糊问题,然 后采用一种"双向分段成像"方法估计目标方位向 速度。所谓的"双向分段成像"方法是利用前后两 段部分孔径数据分别对动目标进行粗成像,然后根 据两幅粗像的位置差异计算方位向速度,获得的估 计精度有限。

需要指出的是上述动目标运动参数估计方法大都是基于 SAR 全采样数据的估计方法。近年来,压缩感知理论被广泛地引入到 SAR 应用中,一系列基于稀疏降采样数据的方法被提出,主要用于 SAR 数据压缩^[8],提高 SAR 图像分辨率^[9,10],SAR 平台运动补偿^[11]等方面。稀疏采样方式是未来 SAR 实际应用中一个重要发展方向,因此有必要研究基于稀疏采样数据的动目标运动参数估计方法。

参数化稀疏表征是字典学习的一个特殊分支, 能够实现雷达探测过程中未知参数的动态学习和雷 达信号的最优稀疏表征[12],其概念最早在文献[13] 中提到,被用于逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像。文献[12]综述了参数 化稀疏表征在雷达探测中的应用,重点介绍了参数 化稀疏表征在 ISAR 成像、SAR 自聚焦和目标识别 中的应用。本文结合压缩感知理论,将目标运动参 数作为影响观测模型的唯一变量,通过优化动目标 成像结果的稀疏性来估计目标的运动参数。文章首 先分析了动目标回波信号稀疏采样数据的特点,然 后构建一个转换模型,将动目标回波信号转换为等 效的斜视 SAR 回波信号。可以证明,等效后的平台 速度、斜视角与原动目标模型中目标 2 维速度成一 一对应关系。利用作者前期提出的斜视 SAR 压缩感 知成像算法[14],实现动目标的粗成像。在目标2维 速度速度域进行搜索,所选取的2维速度越接近真 值,所获得的成像结果聚焦性能将越好。最终本文 以图像熵最小化为准则,在2维速度域估计出动目 标径向和方位向 2 维速度。本文方法可以克服 Doppler 模糊问题,相比于传统方法,可以采用稀

疏采样数据完成对动目标的运动参数精确估计,减 少了所需数据量的同时获得较高的估计精度。文章 采用仿真数据进行了实验,说明了本文算法的有效 性,并且讨论了信杂比对本文估计方法的影响,分 析了本文估计方法对目标径向速度和方位向速度的 估计精度。

2 信号模型

本文考虑传统单天线 SAR 系统,工作模式为正 侧视条带式,SAR 平台与观测场景 2 维示意图如图 1(a)所示。假定 SAR 装载在飞机平台上,并沿着 x 轴 以速度 V 做匀速直线飞行。假设观测场景中有一动 目标 P,径向速度分量记为 v_y (以靠近 SAR 平台飞 行轨迹方向为正方向),方位向速度分量记为 v_x (以 SAR 平台速度方向为正方向), (v_x,v_y) 即我们需要 估计的参数。为了便于说明方法推导,我们首先采 用全采样数据进行模型分析。SAR 平台以"走停" 模式发射并接受信号,脉冲重复频率记为 PRF。图 1 中标出了各虚拟合成孔径阵元位置。不失一般性, 我们假设目标处于 SAR 平台正侧方时坐标为 $(0,r_0)$,其中 0 表示方位向坐标, r_0 表示距离向坐标, 并以当前时刻为慢时间零点t = 0。则动目标与 SAR 瞬时距离为

$$R(t) = \sqrt{(r_0 - v_y t)^2 + (Vt - v_x t)^2}$$
(1)

本文采用线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号作为 SAR 发射信号,运动参数为 (v_x, v_y) 的运动目标回波可以表示为

$$s(t,\tau) = \sum_{k=1}^{K} \operatorname{rect}\left(\frac{\tau - 2R_{k}(t)/c}{T_{p}}\right) \cdot \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T_{a}}\right)$$
$$\cdot \sigma_{k} \exp\left\{j \cdot \left[-\frac{4\pi}{\lambda}R_{k}(t) + \pi K_{r}\left(\tau - 2R_{k}(t)/c\right)^{2}\right]\right\}$$
(2)

其中, K表示该运动目标包含的散射点个数, $R_k(t)$ 表示第 k 个散射点到 SAR 的瞬时距离, T_p 表示脉冲宽度, T_a 表示有效孔径时宽, σ_k 表示第 k 个散射点的散射系数, λ 表示载波波长, K_r 表示调频率, c表示电磁波传播速度。根据相对速度原理, 若以动目标为参考系,即视动目标速度为零,则 SAR 相对于动目标的速度相比于原速度 V 大小和方向均有所改变,速度合成示意图见图 1(a)。在动目标参考系中,原信号观测模型可以等效为斜视 SAR 观测模型,观测场景示意图如图 1(b)所示。根据速度合成原理,易知斜视角、SAR 等效合速度与动目标 2 维速度 (v_x, v_y) 存在如式(3)变换关系,

$$V_{\rm H} = \sqrt{(V - v_x)^2 + v_y^2}$$
 (3a)



图1 观测模型示意图

$$\tan \theta = \frac{v_y}{V - v_x} \tag{3b}$$

其中, $V_{\rm H}$ 为等效的合速度, θ 为等效的模型斜视角。 正常情况下,目标速度分量远小于 SAR 平台速度, 即满足 $V \gg v_x$ 和 $V \gg v_y$,因此有 $V - v_x > 0$,当 v_y 方向为正时等效模型为前斜视,当 v_y 方向为负时等 效模型为后斜视。值得注意的是 $|\theta|$ 取值不会太大, 即等效模型往往为小斜视角模型,有助于问题的简 化。转换为斜视模型后,点目标 P 离等效飞行轨迹 最近距离为 $r_0 \cos \theta$,以单个散射点为例,等效的回 波数据可以表示为

$$s_{\rm D}(t,\tau) = \operatorname{rect}\left(\frac{\tau - 2R(t)/c}{T_{\rm p}}\right)$$
$$\cdot \exp\left\{j\cdot\left[-\frac{4\pi}{\lambda}R(t) + \pi K_{\rm r}\left(\tau - 2R(t)/c\right)^2\right]\right\}$$
(4)

其中, *R*(*t*) 表示在等效的斜视模型下, 散射点 P 到 SAR 的瞬时距离, 利用余弦定理可以得到

$$R(t) = \sqrt{\left(V_{\rm H}t\right)^2 + r_0^2 - 2r_0V_{\rm H}t\sin\theta}$$
(5)

因为 $r_0 \gg V_{\rm H}t$,式(5)可以近似化简为

$$R(t) \approx r_0 - V_{\rm H} t \sin \theta + \frac{\left(V_{\rm H} t \cos \theta\right)^2}{2r_0} \tag{6}$$

在全采样数据条件下,可以采用多种经典算法对斜视模型信号进行成像处理^[15-17],如非线性频调变标算法(Non-linear Chirp Scaling, NCS),距离徙动算法(Range Migration Algorithm, RMA)等。本文所建立的模型在距离向上对回波信号采用随机稀疏采样方式,其采样结果可以看作是全采样数据在距离向上的随机降维观测。对于稀疏采样数据,传统算法将不再适用,因此本文利用前期工作中提出的基于 NCS 算子的斜视 SAR 压缩感知成像方法对动目标回波稀疏采样数据进行成像^[14],然后根据成像结果估计动目标参数,具体操作步骤在第3节论述。

3 基于稀疏采样数据的动目标运动参数估 计

记全采样数据为大小是 N_a×N_r (方位向采样点数×距离向采样点数)的 2 维矩阵 s_r,而稀疏采样数据在距离维上随机抽取,记采样点数为 N'_r,随机稀 疏采样数据 s_r与全采样数据的关系可以表示为

$$\boldsymbol{s}_{\mathrm{rs}} = \boldsymbol{s}_{\mathrm{r}} \cdot \boldsymbol{\Phi}$$
 (7)

其中, **Φ** 表示大小 N_r×N[']_r为的 0-1 观测矩阵, 其每 一列只有 1 个非零元素。首先简单论述在确定的等 效合速度和斜视角条件下,目标成像过程。基于前 期研究基础^[14],我们利用 NCS 算子对稀疏采样数据 成像,其成像本质上是对动目标散射点的稀疏重构。 具体推导过程本文不在赘述,此处只引用部分结论, NCS 算子的构建为

$$\boldsymbol{X} = \Gamma(\boldsymbol{s}_{\mathrm{r}}) = \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{a}} \cdot \{(\{([[(\widehat{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{a}} \cdot [(\boldsymbol{s}_{\mathrm{r}} \cdot \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{r}}) \circ \boldsymbol{H}_{1}]) \\ \circ \boldsymbol{H}_{2}] \cdot \widehat{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{r}} \circ \boldsymbol{H}_{3}] \cdot \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{r}}) \circ \boldsymbol{H}_{4}\} \cdot \widehat{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{r}}) \circ \boldsymbol{H}_{5}\} \quad (8)$$

其中, **X** 表示目标 2 维成像结果, 。表示矩阵的 Hadamard 乘积, $\omega \pi \hat{\omega}$ 分别表示傅里叶变换阵和 逆傅里叶变换阵。式(8)中的 5 个变换因子: H_1 表 示走动补偿函数, H_2 表示 3 次相位滤波函数, H_3 表 示 NCS 操作函数, H_4 表示距离压缩和徙动校正参 考函数, H_5 表示方位压缩和残余相位补偿函数, 具 体表达式为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{H}_{1} &= \exp\left(-j\frac{4\pi V_{\mathrm{H}}t\sin\theta\left(f_{\mathrm{r}}+f_{0}\right)}{c}\right) \\ \boldsymbol{H}_{2} &= \exp\left(j\frac{2\pi r_{0}\left(1-B^{2}\right)f_{\mathrm{r}}^{3}}{cf_{\mathrm{c}}^{2}B^{5}}\right) \\ \boldsymbol{H}_{3} &= \exp\left(j\pi K_{\mathrm{e}}\left(1/B-1\right)\left(\tau-\tau_{d}\right)^{2}\right) \\ \boldsymbol{H}_{4} &= \exp\left(j\frac{4\pi (1/B-1)r_{0}\cos\theta}{c}f_{\mathrm{r}}+j\frac{\pi Bf_{\mathrm{r}}^{2}}{K_{\mathrm{e}}}\right) \\ \boldsymbol{H}_{5} &= \exp\left(j\frac{4\pi r_{0}\cos\theta}{\lambda}B\right) \end{aligned}$$
(9)

其中,
$$f_{\rm r}$$
 表示快时间频域采样, 因子 $B = \sqrt{1 - \left(\frac{f_{\rm a}\lambda}{2V_{\rm H}\cos\theta}\right)^2}$, $K_{\rm e} = \left(\frac{1}{K_{\rm r}} + \frac{2r_0\left(1 - B^2\right)}{cf_{\rm e}B^3}\right)^{-1}$, $f_{\rm a}$ 为

慢时间频率采样。由式(8)可知, NCS 算子通过对回 波信号进行一系列矩阵处理,可以获得目标 2 维图 像,结合式(7),对于稀疏采样数据目标图像的重建 相当于求解如式(10)问题:

$$\min \|\boldsymbol{X}\|_{0}, \quad \text{s.t.} \quad \boldsymbol{s}_{\text{rs}} = \Gamma^{-1}(\boldsymbol{X}) \cdot \boldsymbol{\Phi}$$
(10)

式中, $\Gamma^{-1}(\mathbf{X})$ 表示 NCS 算子的逆运算,是式(8)所 述运算的逆过程。本文采用改进的 ITA 算法^[14],求 解式(10)中的优化问题,在求解过程中,将 $\Gamma^{-1}(\mathbf{X})$ 计算出来的结果作为一个整体,代入到下一步迭代 中,这样就避免了传统 ITA 中具体的矩阵相乘要 求^[18]。

上述方法是在合速度和斜视角确定情况下的稀 疏采样数据目标成像方法,针对运动参数未知的运 动目标,其等效得出的合速度和斜视角也是未知的。 采用不同的运动参数进行上述过程求解,可以获得 不同的成像结果,因此目标像 X 可以看作是目标速 度参数的隐函数 $X(v_x,v_y)$ 。当 (v_x,v_y) 与实际参数匹 配时,才能得到清晰的目标 2 维像。图像熵是常用 的衡量复图像清晰度的指标^[19],因此本文采用 $X(v_x,v_y)$ 熵值最小化为优化目标,在 2 维速度空间 $V_x - V_y$ 内估计目标运动参数。复图像 Z 的计算公式 为

$$E(\boldsymbol{Z}) = -\sum_{m,n} |z_{mn}|^2 \lg \left(|z_{mn}|^2 \right)$$
(11)

其中, $\sum_{m,n} |z_{mn}|^2 = 1$, $|z_{mn}|$ 是复图像归一化后第 *m* 行第 *n* 列像素的模值。目标 2 维速度估计问题可以 表述为求解如式(12)优化问题:

$$\{ v_x, v_y \} = \min E\left(\boldsymbol{X}\left(v_x, v_y\right) \right),$$

s.t. $\boldsymbol{s}_{rs} = \Gamma^{-1}\left(\boldsymbol{X}\left(v_x, v_y\right) \right) \cdot \boldsymbol{\Phi}$ (12)

求解上述问题,可以将2维速度空间V_x-V_y离散化, 在各离散点分别计算重构结果熵值,通过搜索最小 值确定目标2维速度。综上所述,本文所提目标速 度估计方法可以概括为如下4个步骤:

步骤1 在整幅 SAR 图像中提取感兴趣的动目 标区域,并将其转换到原始数据域;

步骤 2 对 2 维速度空间离散化,并根据式(3) 将离散点从 2 维速度空间映射到合速度-斜视角空间,利用 ITA 算法求解式(10)所述稀疏重构问题;

步骤3 根据式(11)计算重构结果的图像熵;

步骤 4 根据式(12)确定最小熵值对应的目标 2 维速度 (v_x, v_y) 。

关于上述速度估计方法,需要说明两点:第一, 动目标在整个 SAR 观测场景中往往是稀疏分布的, 具有空间稀疏性,且步骤 1 可以去除部分背景杂波, 提高动目标局部信杂比;第二,在搜索图像最小熵 时,可以采取变步长搜索方式,首先采用大步长搜 索减少运算时间,然后在极值附近采用小步长搜索 提高估计精度。

4 实验结果与性能分析

本节采用仿真数据验证本文方法的有效性,并 根据实验结果分析本文方法性能。实验中用到的 SAR 主要参数如下: SAR 平台速度V = 100 m/s, 载波波长 $\lambda = 0.03 \text{ m}$,发射信号带宽200 MHz,脉 宽 $T_p = 10 \mu \text{s}$,天线实际孔径长度D = 0.49 m,脉 冲重复频率 PRF = 1000 Hz,场景中心与 SAR 平台 飞行轨迹之间的距离为 $r_0 = 10 \text{ km}$,距离向全采样 点数为 $N_r = 4096$ 。观测场景如图 2 所示,尺寸为 32 m×32 m,其中包含若干静止散射点,A 为匀速 运动目标,其方位向速度分量为 $v_x = 5 \text{ m/s}$,距离 向速度分量为 $v_y = 8 \text{ m/s}$ 。根据动目标 Doppler 中 心计算公式,可以得到 $f_a = 2v_y/\lambda = 533 \text{ Hz}$,已经 超出[-PRF/2,PRF/2],因此会出现 Doppler 模糊。

首先,我们通过实验验证本文所构建的转换模型的正确性。对距离向数据进行随机稀疏采样,仅录取 $N'_{\rm r} = 2048$ 个采样点,定义降采样率为 $\eta = N_{\rm r}/N'_{\rm r} = 2$ 。图 3(a)是采用模型参数($V_{\rm H} = V, \theta = 0$)获得的成像结果,其中静止目标可以获得准确聚焦结果,但是运动目标无法正常聚焦,并且其散焦效应使得静止散射点成像受到干扰。图 3(b)采用本文模型对动目标进行成像,最终获得整个场景的准确重构结果,实验结果说明了采用本文所提出的等效斜视模型,在运动参数确定的情况下可以实现对运动目标的准确成像。

在运动目标运动参数未知情况下,利用本文方 法对运动参数进行估计,仿真实验中设定信杂比为 SCR = 10 dB。以 SAR 平台速度的 20%为运动参数 估计区间,即在仿真实验中, $v_x = v_y$ 搜索范围均为 [-20 m/s, 20 m/s]。计算各搜索点的图像熵值,结 果如图 4。因为图中纵轴采用负熵值坐标,因此峰 值位置对应了最小熵位置,从图 4 中可以看出峰值 位置对应的运动参数估计结果为 ($v_x = 5 \text{ m/s}, v_y = 8 \text{ m/s}$),这与目标运动参数真值完全一致。本文方 法提供了目标在方位向和距离向 2 个维度上的速度 分量,图 5 给出了熵值图在两个维度上剖面图,通 过对比方位向和距离向速度-熵值剖面图,可以看出 图 5(a)中方位向熵值图的峰值宽度明显小于图 5(b)



(a)传统模型

(b)等效模型





图 4 V_x - V_y 2 维速度空间动目标粗像熵值分布图

中距离向熵值图的峰值宽度。这与实际情况相符, 方位向的速度误差对图像散焦影响更大。为了进一 步分析本文所提估计方法的性能,在不同信杂比条

X:5

-10

0

 $v_x(m/s)$

(a)方位向速度

10

20

Y:-2.289e

-2.2

-2.3

(1.101) (1.1

-2.6 -2.7 -20



件下,分别考察方位向和距离向速度参数的估计精度,同时分析降采样率对估计精度的影响。图 6 给 出了不同条件下,估计结果的相对误差结果,其中 最小搜索步长为0.1 m/s。从图中可以看出随着信杂 比的提高,相对误差逐渐减小。降采样率为η=2条 件下,当信杂比达到 6 dB 以上时,方位向速度分量 和距离向速度分量估计结果的相对误差均可控制在 2.5%以内。此外,本文算法处理过程中用到了稀疏 重构理论,降采样率队估计精度有一定影响,随着 估计降采样率增大,相对误差也有所增大。

当场景中有多个不用运动参数的运动目标时, 可以通过图像分割的方法分别估计不同目标的运动





图 5 目标粗像熵值 1 维剖面图



图 6 动目标速度参数相对误差与信杂比(SCR)关系曲线

参数。若不同目标散焦图像之间有重叠,无法分离, 也可采用本文方法同时估计 2 个目标的运动参数。 以前一节仿真实验为例,将图 2 中 B 目标更改为运 动目标,其 2 维运动参数为 ($v_x = -3 \text{ m/s}, v_y = -4 \text{ m/s}$)。图 7 给出了包含估计结果信息的熵值图, 图中出现两个峰值,分别对应两个运动目标的运动 参数。



图 7 双目标 V_x - V_y 2 维速度空间动目标粗像熵值分布图

5 结束语

本文根据速度合成原理将 SAR 动目标观测模 型转换为斜视 SAR 观测模型,然后利用改进的 ITA 算法对动目标回波稀疏采用数据进行处理,以动目 标粗像熵值最小化为准则,在2维速度空间估计动 目标的运动参数。利用本文提出的动目标运动参数 估计方法,可以准确估计出稀疏采样数据条件下的 动目标运动参数,在降采样率η=2条件下,当信杂 比达到6dB时,估计值的相对误差可以控制在2.5% 以内。此外,本文估计方法还可以克服 Doppler 模 糊,并且能够同时实现多个目标运动参数的估计, 本文采用仿真数据对模型正确性和算法性能进行了 验证分析。下一步工作重点是设计相应的迭代算法, 实现熵值最小化。

参考文献

- SAEEDI J and FAEZ K. Synthetic aperture radar imaging using nonlinear frequency modulation signal[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(1): 99–110. doi: 10.1109/TAES.2015.140310.
- [2] WERNESS S A S, CARRARA W G, JOYCE L S, et al. Moving target imaging algorithm for SAR data[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(1): 57–67. doi: 10.1109/7.53413.
- [3] PERRY R P, DIPIETRO R C, and FANTE R L. SAR imaging of moving targets[J]. *IEEE Transactions on* Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1): 188–200. doi: 10.1109/7.745691.
- [4] ZHANG Shuangxi, XING Mengdao, XIA Xianggen, et al. Robust clutter suppression and moving target imaging

approach for multichannel in azimuth high-resolution and wide-swath synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions* on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(2): 687–709. doi: 10.1109/TGRS.2014.2327031.

- [5] GUO Bin, VU Duc, 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.
- [6] LI Gang, XIA Xianggen, XU Jia, et al. A velocity estimation algorithm of moving targets using single antenna SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(3): 1052–1062. doi: 10.1109/TAES.2009.5259182.
- [7] HOU Lili, SONG Hongjun, ZHENG Mingjie, et al. Fast moving target imaging and motion parameters estimation based on Radon transform and bi-directional approach[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(6): 1013–1023. doi: 10.1049/iet-rsn.2014.0567.
- [8] 陈一畅,张群,朱丽莉,等. 基于压缩感知和矢量量化的SAR数据级联压缩方法[J].现代雷达,2013,35(10):36-40.doi: 10.16592/J.CNKI.1004-7859.2013.10.013.
 CHEN Yichang, ZHANG Qun, ZHU Lili, *et al.* A cascade compress method of SAR data based on compressed sensing and vector quantization[J]. *Modern Radar*, 2013, 35(10): 36-40. doi: 10.16592/J.CNKI.1004-7859.2013.10.013.
- [9] BU Hongxia, TAO Ran, BAI Xia, et al. A novel SAR imaging algorithm based on compressed sensing[J]. *IEEE Geoscience* and Remote Sensing Letters, 2015, 12(5): 1003–1007. doi: 10.1109/LGRS.2014.2372319.
- [10] 陈一畅,张群,陈校平,等. 多重测量矢量模型下的稀疏步进频率 SAR 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 2986-2993. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01831.
 CHEN Yichang, ZHANG Qun, CHEN Xiaoping, et al. An imaging algorithm of sparse stepped frequency SAR based on multiple measurement vectors model[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(12): 2986-2993. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01831.
- [11] GU Fufei, ZHANG Qun, CHI Long, et al. A novel motion compensating method for MIMO-SAR imaging based on compressed sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(4): 2157–2165. doi: 10.1109/JSEN.2014.2371451.
- [12] 李刚,夏香根.参数化稀疏表征在雷达探测中的应用[J]. 雷达 学报, 2016, 5(1): 1-7. doi: 10.12000/JR15126.
 LI Gang and XIA Xianggen. Parametric sparse representation and its applications in radar sensing[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(1): 1-7. doi: 10.12000/JR15126.
- [13] RAO W, LI G, Wang X, et al. Parametric sparse representation method for ISAR imaging of rotating targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(2): 910–919. doi: 10.1109/TAES.2014.

120535.

[14] 顾福飞,张群,杨秋,等. 基于 NCS 算子的大斜视 SAR 压缩 感知成像方法[J]. 雷达学报, 2016, 5(1): 16-24. doi: 10.12000 /JR15035.

GU Fufei, ZHANG Qun, YANG Qiu, *et al.* Compressed sensing imaging algorithm of high-squint SAR based on NCS operator[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(1): 16–24. doi: 10. 12000/JR15035.

[15] 李震宇,梁毅,邢孟道,等. 弹载合成孔径雷达大斜视子孔径 频率相位滤波成像算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 954-959. doi: 10.11999/JEIT140618.

LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, *et al.* A frequency phase filtering imaging algorithm for highly squint missile-borne synthetic aperture radar with subaperture[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 954–959. doi: 10.11999/JEIT140618.

[16] 江淮,赵惠昌,汉敏,等. 基于 DFT 滤波器组的大斜视 SAR 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 104-110. doi: 10.11999/JEIT150381.

JIANG Huai, ZHAO Huichang, HAN Min, *et al.* Highly squint SAR imaging algorithm based on DFT filter banks[J].

Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(1): 104–110. doi: 10.11999/JEIT150381.

- [17] 杨军,李震宇,孙光才,等. 一种新的大斜视 TOPS SAR 全孔 径成像方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2015, 42(1): 42-48. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2015.01.08.
 YANG Jun, LI Zhenyu, SUN Guangcai, *et al.* Novel full aperture imaging algorithm for highly squinted TOPS SAR[J]. *Journal of Xidian University*(*Natural Science*), 2015, 42(1): 42-48. doi: 10.3969 /j.issn.1001-2400.2015.01.08.
- [18] FANG Jian, XU Zongben, ZHANG Bingchen, et al. Fast compressed sensing SAR imaging based on approximated observation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(1): 352–363. doi: 10.1109/JSTARS.2013.2263309.
- [19] KRAGH T J and KHARBOUCH A A. Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus[C]. IEEE International Conference on Image Processing, Atlanta, 2006: 645–648.
- 陈一畅: 男,1988年生,博士生,研究方向为稀疏微波成像.
- 张 群: 男,1964年生,教授,博士生导师,主要研究方向包括 雷达信号处理、电子对抗.