

基于 DPCA-FrFT 的机载三通道 SAR-GMTI 及成像方法

陈 稳, 张智军, 秦占师, 肖冰松, 马 赢

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对慢速运动目标在时域和频域上都落入主杂波区不易被检测的特点, 提出一种三通道条件下机载合成孔径雷达地面动目标检测(SAR-GMTI)方法。采用相位中心偏置天线技术(DPCA)对消杂波, 利用分数阶傅里叶变换(FrFT)估计剩余的动目标参数, 再构造方位压缩参考函数对场景成像。该方法充分利用三通道的信息冗余, 发挥DPCA稳健的杂波对消能力和FrFT的良好能量聚焦性能, 能够实现对包括径向加速度等在内的目标参数精确估计。实验仿真结果验证了本方法的有效性。

关键词: 机载合成孔径雷达; 运动目标检测; 相位中心偏置天线; 分数阶傅里叶变换

中图分类号: V271.4; TN956 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)03-0031-05

Study on Multi-Channel SAR-GMTI and Imaging Based on DPCA-FrFT

CHEN Wen, ZHANG Zhi-jun, QIN Zhan-shi, XIAO Bing-song, MA Ying

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: It is difficult to detect a target with a low speed since it may drop into main lobe clutter in both time domain and frequency domain. A multi-channel SAR-GMTI algorithm was proposed to solve this problem, which can suppress the clutter with Displaced Phase Center Antenna (DPCA), estimate the parameters of moving target with Fractional Fourier Transform (FrFT), and acquire the scene image by constructing the azimuth compression function. The proposed approach takes full advantages of the abundant information of three channels, makes use of the ideal clutter cancellation capability of DPCA technique and the fine energy focusing ability of the FrFT, which can estimate the parameter of moving target accurately, including radial acceleration. The results of the simulation indicate the effectiveness of the methods.

Key words: airborne synthetic aperture radar (SAR); ground moving target indication (GMTI); DPCA; FrFT

0 引言

在现代军事侦察与监视中,运动目标(如运输车辆,运动的坦克和直升机等)往往具有很大的威胁。利用合成孔径雷达实现空对地的动目标检测和成像,对于拓展军事信息来源和提高战场感知能力具有重要意义。传统的单通道信号检测动目标的方法往往把地杂波与噪声混在一起作为纯干扰处理,散失了静止背景信息,检测效果不好。而且,单通道方法一般要求系统的脉冲重复频率(PRF)较高,导致合成孔径雷达(SAR)测绘带

宽的减小和系统数据率的提高。多通道方法可以有效对消杂波,获得较好的检测效果和成像质量,有效解决上述问题。目前SAR系统中,采用的多通道合成孔径雷达地面动目标检测(SAR-GMTI)技术主要有沿航迹干涉技术(ATI)^[1]和相位中心偏置技术(DPCA)^[2]。DPCA的杂波抑制性能稳健,且工程实现简单,近年来不断得到发展更新,成为SAR动目标检测的典型算法。

分数阶傅里叶(Fourier)变换(FrFT)是Fourier变换的广义形式,能够展示出信号从时域到频域的所有特征,它将信号分解在FrFT域的一组正交的chirp基上,更适于用来分析或处理某些时变的非平稳信号,特别是线性调频信号,在SAR-GMTI中具有很大的优越性^[3-4]。国内外许多学者对其在SAR-GMTI中的应用做了深入研究:文献[5]提出在原始数据域利用DPCA

收稿日期:2013-10-09

修回日期:2014-05-26

基金项目:航空科学基金(20145596025)

作者简介:陈 稳(1990—),男,湖南浏阳人,硕士生,研究方向为微波信号处理及工程应用。

检测动目标,在获得距离门先验信息后,利用 FrFT 聚焦双通道信号能量再进行 ATI 估计;文献[6]把空时自适应处理(STAP)、FrFT 和 DPCA 技术结合起来,在三通道条件下实现目标参数估计;文献[7]结合 FrFT、重排谱图和逐个消除(CLEAN)思想,实现时频平面同一直线上多个目标的分辨。但是上述方法没有考虑目标的加速运动,而且对回波幅度估计和相位估计时产生较大误差。

本文基于三通道 SAR 系统建立运动目标回波模型,对回波信号进行必要的简化和假设。基于 FrFT 和 DPCA 方法的特性,提出一种改进型的 DPCA-FrFT 三通道合成孔径雷达地面运动目标检测和成像方法。在简化参数估计步骤的同时,实现径向加速度估计和杂波消除,以及整个场景的成像。

1 回波 DPCA 处理

假设系统采用单孔径发射全孔径接收模式,空间模型如图 1 所示。

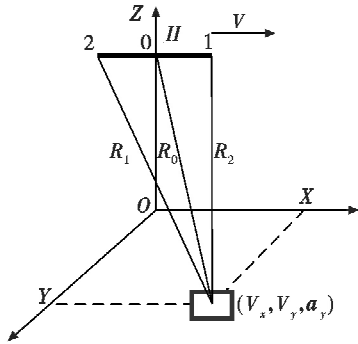


图 1 三通道 SAR-GMTI 几何模型

Fig. 1 Geometrical model of three-channel SAR-GMTI

雷达采用正测式工作,天线 0 发射重复周期为 T 的线性调频信号,天线 0,1,2 分别接收回波。相邻天线间距 $d_{01}=d_{02}=d$,且满足 DPCA 条件 $d=2m \cdot T \cdot V$, m 为正整数。图 1 中: $(X, Y, 0)$ 为动目标初始位置; H 为载机高度; V 为载机速度; (V_x, V_y) 为动目标初始速度; a_r 为径向加速度。采用距离多普勒(RD)算法^[8]处理,在距离压缩和方位距离解耦合后以中间孔径 0 为基准,对孔径 1,2 进行时间校准和相位补偿后,取通道 1 数据分别与通道 0,2 两两对消(其中还涉及到距离的泰勒展开、快时间项合并,具体步骤参见文献[9]),对消信号表示为

$$\begin{cases} S_{01} = C_0 \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\{j\pi K t^2 + j2\pi f_0 t + j\phi_0\} \\ S_{21} = C_1 \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\{j\pi K t^2 + j2\pi f_1 t + j\phi_1\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_0, C_1 为幅度,即

$$\begin{cases} C_0 = 2\sigma \text{us} \sin\left(\frac{\pi d Y V_y}{\lambda R V}\right) \\ C_1 = 2\sigma \text{us} \sin\left(\frac{2\pi d Y V_y}{\lambda R V}\right) \end{cases}; \quad (2)$$

K 为动目标多普勒调频率,即

$$K = -\frac{2[(V - V_x)^2 + V_y^2] + R a_r}{\lambda R};$$

f_0, f_1 为动目标多普勒中心频率,即

$$\begin{cases} f_0 = -\frac{2[YV_y - (X - d/2)(V - V_x)]}{\lambda R} \\ f_1 = -\frac{2[YV_y - (X - d)(V - V_x)]}{\lambda R} \end{cases}; \quad (3)$$

ϕ_0, ϕ_1 为相位常数; T_s 为合成孔径时间; u 为发射信号脉宽; σ 为目标发射系数。对于静止目标, $(V_x, V_y) = (0, 0)$, $S_{01} = 0, S_{21} = 0$, 说明静止目标被对消掉,能够很好地抑制杂波,而运动目标由于 $(V_x, V_y) \neq (0, 0)$, 被保留下来。此时,为了提高检测性能,获得更低的最小可检测速度,对两端天线的 DPCA 信号 S_{01}, S_{21}, S_{12} 进行 CFAR 处理,就可检测动目标,获得动目标距离门位置信息和快时间 τ ,由此,得到了动目标回波信号的 chirp 形式。

2 利用 FrFT 估计动目标参数

2.1 分数阶 Fourier 变换

分数阶 Fourier 变换作为一种线性变换,能对 LFM 信号进行有效的能量积累,它采用单一变量表示时频信息,无交叉项干扰,具有传统时频分析方法不具备的优势。分数阶 Fourier 变换的本质是信号在时频平面上,以原点为中心,时间轴逆时针方向旋转任意角度 α 后,所构成的分数阶 Fourier 域 μ 轴上的投影。对一个 LFM 信号,存在一个最佳旋转角度使信号能量在该分数阶 Fourier 域上最大程度地聚集。每一个角度 α 都对应着一个 Fourier 域幅度(能量),如果以 α 为变量,对分数阶 Fourier 域做峰值二维搜索,可以找到信号能量最大程度聚集点,确定最佳旋转角度,实现对 chirp 信号的检测。同时,利用峰值点 (α, μ) 与动目标多普勒参数的对应关系实现参数估计,这就是利用分数阶 Fourier 变换实现 chirp 信号检测和参数估计的基本原理。

2.2 运动目标参数估计

对运动目标参数的估计,需要峰值点的坐标为条件,对回波 DPCA 后的信号进行 FrFT,信号 S_{12} 的旋转角度 α 的分数阶 Fourier 变换为

$$F^\alpha S_{12}(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{12}(t) K_\alpha(t, \mu) dt = C_1 \sqrt{1 - j \cot \alpha} \cdot \exp(j\pi \mu^2 \cot \alpha + j\phi_1) \cdot \int_{-T_s/2}^{T_s/2} \exp[j\pi(K + \cot \alpha)t^2 + 2j\pi(f_1 - \mu \csc \alpha)t] dt \quad (4)$$

可见,只有在被积函数指数的 t^2 项系数为 0 时,式(4)才为 sinc 函数形式。此时, $K = -\cot \alpha$ 。记 $A = C_1 \cdot$

$\sqrt{1-j\cot\alpha}\exp(j\pi\mu^2\cot\alpha+j\phi_1)$,把 $K=-\cot\alpha$ 代入式(4),转换为

$$A \cdot \int_{-T_s/2}^{T_s/2} \exp[j\pi(2j\pi(f_1 - \mu\csc\alpha)t)] dt = A \cdot T_s \cdot \text{sinc}[\pi T_s(f_1 - \mu\csc\alpha)] \quad (5)$$

当 $f_1 = \mu\csc\alpha$ 时,式(5)有最大值,最大模值为

$$|H_{\max}| = |A| \cdot T_s = |A| \cdot T_s \sqrt{|\csc\alpha|}$$

为了 FrFT 计算方便,需要将频域和时域分别变换成无量纲的域,即要考虑量纲归一化。通过峰值二维搜索得到峰值点的 $(\tilde{\alpha}, \tilde{\mu})$,于是

$$\begin{cases} \tilde{K} = -\frac{f_{\text{PRF}}^2}{N} \cdot \cot \tilde{\alpha} \\ \tilde{f}_1 = \frac{f_{\text{PRF}}}{N} \cdot \tilde{\mu} \cdot \csc \tilde{\alpha} \\ |\tilde{A}| = |\tilde{H}_{\max} \sqrt{N} / \csc \tilde{\alpha}| \end{cases} \quad (6)$$

式中: N 为信号长度; f_{PRF} 为雷达脉冲重复频率; α 为变换角度;所有带上标“~”的字母表示估计量; f_{PRF}^2/N , f_{PRF}/N 为量纲归一化引入的比例系数。

要实现对动目标的测速和定位等,仅仅估计多普勒参数是不够的。由于 $R \gg X$,所以 $\tilde{R} \approx \frac{1}{2}c\tilde{\tau} = (X^2 + Y^2 + H^2)^{1/2}$,能够估计动目标初始距离,其中,快时间 τ 的估计在 CFAR 处理时,由搜索的距离单元确定。

由于待估计的参数有5个 (X, Y, V_x, V_y, a_y) ,所以至少需要5个相关的关系式才能完成对参数的有效估计。本文采用的两端天线对消法提供了更方便和精确的关系式。由式(1)和式(3),理论上这两路对消后的信号只留下动目标信息。因此,把这两路信号做幅度比可以得到关于 V_y 的方程

$$\left| \frac{S_{21}}{S_{01}} \right| = \left| \frac{C_1}{C_0} \right| = 2 \left| \cos\left(\frac{\pi d Y}{\lambda R V} V_y\right) \right| \quad (7)$$

由式(7)可以确定 V_y 的模值,但方向的确定还需要结合多普勒信息讨论。由于载机与目标的距离 R 相对于目标的初始位置都比较大,所以 $f_1 \approx -\frac{2}{\lambda}V_y$,可确定 V_y 的方向。

此外,取两路对消后信号做干涉处理,取干涉相位可以得到方位向速度的估计值

$$S = S_{01} \cdot \text{conj}(S_{21}) = C_0 \cdot C_1 \exp[j2\pi(f_0 - f_1)] =$$

$$C_0 C_1 \exp\left[j2\pi \cdot \frac{d(V - V_x)}{2\lambda R}\right] \quad (8)$$

所以,方位向速度的估计值可表示为

$$\tilde{V}_x = 2\lambda R \left(\frac{f_1 - f_0}{d} + V \right) \quad (9)$$

综合式(6),式(7),式(9)和等效距离方程,可以求出待测参数 (X, Y, V_x, V_y, a_y) 的估计值。

3 整个场景的成像

基于之前构建的模型,系统中存在动目标和大量地面静目标。如果直接对回波采用经典成像算法成像,目标运动引起的额外的多普勒信息会导致动目标图像的散焦和位置偏移,所以不能同时对静目标和动目标聚焦,而要把动目标提取出来分别成像,再把两者叠加。本文采用的成像算法基于 R-D 算法,整个成像流程如图2所示。

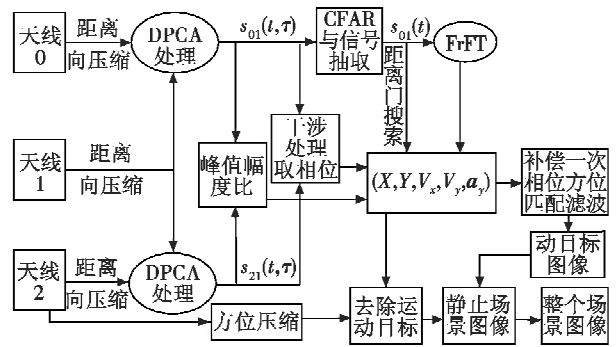


图2 DPCA-FrFT 动目标检测和成像流程图

Fig. 2 Flow chart of moving target detecting and imaging by DPCA-FrFT

首先,根据估计的目标参数,构造动目标回波,进行方位压缩成像;然后,取通道2数据 S_2 ,采用静止目标的匹配滤波器进行方位压缩,得到包含动目标信息的图像,在该图像域根据构造的动目标回波,去除运动目标信号,得到静止场景的图像;最后,把两者叠加在一起,得到整个场景的图像。

动目标压缩成像的主要难点是构造一个合适的方位向参考函数,进行方位压缩成像。由于多普勒参数估计值和真实值的误差会对 R-D 算法的距离弯曲校正产生影响,所以,这里采用无需确定多普勒参数就能进行距离徙动校正的包络对齐法。

根据估计的动目标参数,设定方位压缩参考函数为

$$h_x(t) = \exp\left[-j\pi K \cdot \left(t - \frac{X}{V - V_x}\right)^2 + 2j\pi f \left(t - \frac{X}{V - V_x}\right)\right] \cdot \text{rect}\left[\left(t - \frac{X}{V - V_x}\right) / T_x\right] \quad (10)$$

则方位压缩后的动目标信号为

$$S_{\text{mov}}(t, \tau) = \text{IFFT}\{\text{FFT}[S_y(t, \tau)] \cdot \text{FFT}[h_x(t)]\} = \sigma u T_s \cdot \text{sinc}\left[\pi B \left[\tau - \frac{2R_0(t)}{c}\right]\right] \cdot \text{sinc}\left[\pi B_x \left(t - \frac{X}{V - V_x}\right)\right] \cdot \exp\left[j2\pi f \left(t - \frac{X}{V - V_x}\right) - \frac{j4\pi R}{\lambda}\right] \quad (11)$$

式中: B 表示雷达发射信号带宽,等于脉宽 u 和调频率 K 的乘积; $R_0(t)$ 为动目标到孔径的距离,具体表述见

文献[9]。需要说明的是,方位压缩参考函数考虑了参数估计值对距离弯曲校正的影响,使动目标能够更好地聚焦在真实位置上。

取通道1回波,利用估计的参数去除其中的动目标得到静止场景的回波为

$$\hat{S}_{\text{back}} = \hat{S}_1 - \hat{S}_{\text{mov}} = \sigma \cdot \exp(j\phi_g + j2\pi f_g t + j\pi K_g t^2) \quad (12)$$

$$\text{式中: } \phi_g = \frac{-4\pi}{\lambda} \left(R + \frac{(X+d)^2}{2R} \right); f_g = \frac{-2(X+d)V}{\lambda R}; K_g = -2V^2/(\lambda R)。$$

对静止场景回波进行方位压缩成像,得到静止场景图像为

$$S_{\text{back}}(t) = \sigma |K| |K_x| Tu \cdot \text{sinc} \left\{ K_x T \left(t - \frac{X}{V} \right) \right\} \quad (13)$$

式中, $K_x = -2V^2/(\lambda R)$ 。

最后把动目标像叠加到静止场景图像中,得到整个场景的像

$$S_{\text{whole}} = S_{\text{move}} + S_{\text{back}} \quad (14)$$

4 仿真分析

为验证本文改进的算法的先进性,设置以下对比分析:1) 在无噪声杂波干扰情况下,本文算法与 DPCA 方法进行对比,分析两者在目标参数估计和场景成像上的性能;2) 在加入一定噪声杂波干扰情况下,对比分析本文算法与 DPCA 方法在杂波抑制方面的性能。

设置系统仿真参数如下:载机高度 5 000 m,载机速度 100 m/s,载频 10 GHz,发射信号脉宽 6 μ s,发射信号带宽 30 MHz,孔径天线间隔 4.4 m,合成孔径长度 400 m,距离采样率 40 MHz,重复频率为 180 Hz。目标参数为:距离向速度 $V_y = 1$ m/s,方位向速度 $V_x = 4$ m/s, $a_y = 0.3$ m/s²,初始位置(100 m,9 000 m)。

4.1 动目标检测

分别利用 DPCA 方法和 DPCA-FrFT 方法进行动目标检测,仿真中,考察瑞利分布杂波背景下的参数估计,同时还加入了不同程度的系统噪声。信杂比(SCR)为 -20 dB,信噪比(SNR)为 -10 dB。

从图3可以看出,在没有噪声和杂波的情况下,采用 DPCA 方法可以检测到动目标;而在 SCR 为 -20 dB,SNR 为 -10 dB 条件下,使用 DPCA 方法检测目标时,动目标信号淹没在杂波噪声中无法分辨。事实上,虽然两个通道的对消处理对杂波具有很好的抑制作用,但是 DPCA 对噪声的稳健性并不好。所以,单纯的 DPCA 方法对于动目标的检测性能不够好。

在同等条件下运用 DPCA-FrFT 方法检测动目标的效果如图4所示。

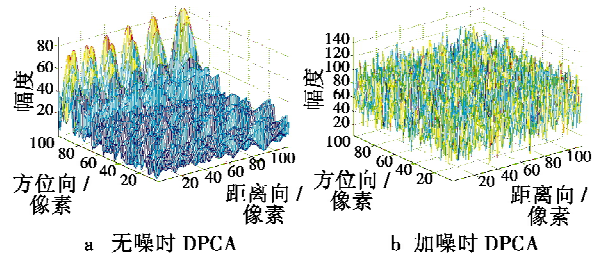


图3 DPCA 检测动目标结果

Fig. 3 The moving target detection result of DPCA

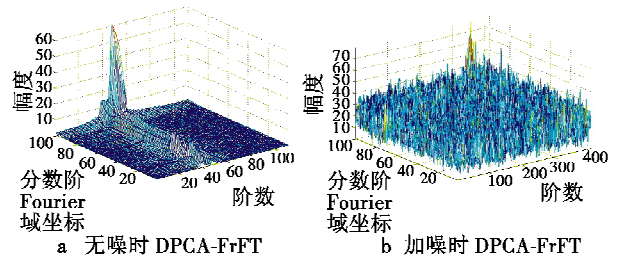


图4 DPCA-FrFT 检测动目标结果

Fig. 4 The moving target detection result of DPCA-FrFT

由图4可以看出,即使在 SCR 为 -20 dB,SNR 为 -10 dB 条件下,DPCA-FrFT 方法也能检测到目标的存在。由于该方法综合了 FrFT 优良的噪声抑制性能和 DPCA 稳健的杂波对消能力,因此,提高了 DPCA 的检测能力。

4.2 运动参数估计

把参数估计值与仿真设定值对比,以此评价估计的准确度。表1为无杂波噪声干扰时参数估计的结果,可见,目标参数的估计值与真实值偏差很小,估计精度高。

表1 无噪声时运动参数真实值与估计值

Table 1 Estimated and true values of parameters without noise

| | 真实值 | 估计值 | 偏差 |
|--------------------------------------|-------|----------|-------|
| X/m | 100 | 99.13 | 0.87 |
| Y/m | 9 000 | 9 003.37 | 3.37 |
| $V_x/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 4 | 4.376 | 0.376 |
| $V_y/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 1 | 1.021 | 0.021 |
| $a_y/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ | 0.3 | 0.300 9 | 0.009 |
| $K/(\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$ | 70 | 69.66 | 0.34 |
| f_0/Hz | 25.4 | 25.747 | 0.347 |

表2是 SCR 为 -20 dB、不同 SNR 条件下目标参数估计结果,可见,虽然参数估计精度随信噪比变化出现波动,但是波动范围小,精度始终保持较高水平。这是因为,分数阶 Fourier 变化对 LFM 信号具有良好的聚焦作用,而对杂波和噪声聚焦性不好,即不受到杂波和噪声的干扰,也就对后期的参数估计影响不大。

表 2 不同信噪比下运动参数估计值偏差

Table 2 Estimated error of target parameters under different SNRs

| | SNR/dB | | |
|-----------------|--------|-------|-------|
| | 0 | -5 | -10 |
| $\Delta X/\%$ | 0.87 | 1.05 | 1.09 |
| $\Delta Y/\%$ | 0.037 | 0.038 | 0.029 |
| $\Delta V_x/\%$ | 9.414 | 9.421 | 9.407 |
| $\Delta V_y/\%$ | 2.17 | 2.17 | 2.32 |
| $\Delta a_y/\%$ | 3.003 | 3.01 | 3.35 |
| $\Delta K/\%$ | 0.486 | 0.487 | 0.486 |
| $\Delta f_0/\%$ | 1.366 | 1.366 | 1.371 |

4.3 场景成像

不考虑杂波和噪声,分别采用常规的 SAR 成像算法和本文的成像算法对场景进行成像,如图 5 所示。

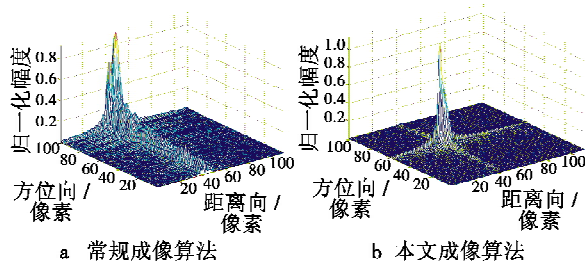


图 5 动目标成像结果

Fig. 5 Imaging of moving target

采用常规 SAR 成像算法时,由于采用静止目标对应的多普勒参数进行方位压缩,所以动目标会出现明显的拖尾和方位散焦;而本文采用的成像算法在精确估计动目标参数的基础上对其重新定位、聚焦,从图 5b 可看出,动目标聚焦效果良好,场景成像清晰。实际上,FrFT 达到峰值时变换中的二次项具有类似匹配滤波器的脉冲压缩功能,因此还被用作方位压缩成像的替代^[10]。

5 结束语

在强杂波和低信噪比条件下,慢速运动目标因其在时域、频域上都落入主杂波区,成为 SAR-GMTI 的一个难题。本文提出的三通道 SAR-GMTI 算法,充分利用 DPCA 的稳健杂波对消能力和 FrFT 优异的噪声抑制性能,实现强杂波和低信噪比条件下的动目标检测、定位和聚焦。事实上,本文的参数估计,直接利用三通道原始数据进行变化运算,减少等效假设的步骤,因此运算量小、误差低。

此外,本文没有考虑多目标情况下的参数估计问题,通道间也假设工作在理想状态。机载合成孔径雷达的地面多运动目标检测和 SAR 对进动目标的检测^[11]是下一步的研究重点。

参考文献

[1] CHEN C W. Performance assessment of along-track inter-

ferometry for detecting ground moving targets [C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference, 2004:99-104.

- [2] GABELE M, SIKANETA I. A new method to create a virtual third antenna form a two-channel SAR-GMTI system [C]//Waveform Diversity and Design Conference, 2007: 433-437.
- [3] 陈小龙,关键,黄勇,等.分数阶 Fourier 变换在动目标检测和识别中的应用:回顾和展望[J].信号处理,2013,29(1):85-97. (CHEN X L, GUAN J, HUANG Y, et al. Application of fractional Fourier transform in moving target detection and recognition: Development and prospect [J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(1):85-97.)
- [4] ELGAMEL S A, SORAGHAN J. Enhanced monopulse tracking radar using optimum fractional Fourier transform[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2011, 5(1):74-82.
- [5] CHIU S. Moving target parameter estimation for RADAR-SAT-2 Moving Object Detection Experiment (MODEX) [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(15):4007-4032.
- [6] 孙华东,宿富林,张晔.基于 STAP-FrFT-DPCA 的 SAR 运动目标检测与参数估计算法研究[J].宇航学报,2008,29(4):1358-1363. (SUN H D, SU F L, ZHANG Y. Research on SAR moving target detection and parameter estimations based on STAP-FrFT-DPCA [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(4):1358-1363.)
- [7] 邓彬,秦玉亮,王宏强,等.一种改进的基于 FrFT 的 SAR 运动目标检测与成像方法[J].电子与信息学报,2008,30(2):326-330. (DENG B, QIN Y L, WANG H Q, et al. A modified method of SAR moving target detection and imaging based on fractional Fourier transform [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2008, 30(2):326-330.)
- [8] SMITH A M. A new approach to range-Doppler SAR processing [J]. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12(2):235-251.
- [9] 杨贤林,潘志刚,沈汀.机载双通道 SAR/DPCA 误差分析[J].电子与信息学报,2007,29(3):536-539. (YANG X L, PAN Z G, SHEN T. Error analysis for airborne dual-channel SAR/DPCA system [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(3):536-539.)
- [10] 李海宁,赵健,洪文,等.基于分数傅立叶变换的 SAR 成像算法研究[J].遥测遥控,2007,28(1):20-24. (LI H N, ZHAO J, HONG W, et al. SAR imaging algorithm based on fractional Fourier transform [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2007, 28(1):20-24.)
- [11] 张伟,童创明,张群,等.基于时频分析的双通道 SAR 自旋目标检测[J].航空学报,2011,32(10):1914-1923. (ZHANG W, TONG C M, ZHANG Q, et al. Rotating targets detection with dual-channel SAR based on time-frequency analysis [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10):1914-1923.)