

# 基于 DPCA-FrFT 的三通道 SAR-GMTI 方法

刘安娜<sup>1,2</sup>, 陈 力<sup>2</sup>, 赵 斐<sup>2</sup>, 匡纲要<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学, 湖南长沙 410073; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 提出了一种新的基于 DPCA-FrFT 的三通道 SAR-GMTI 方法, 既可工作在原始数据域, 又可工作在图像域. 该算法以 DPCA 信号的 chirp 特征为基础, 引入分数阶傅里叶变换, 可同时估计出运动目标的位置、速度和径向加速度, 实现了运动目标参数的全面、准确描述. 当工作在原始数据域时, 再利用方位向 FrFT 得到 GMTI 图像; 而工作在图像域时, 根据估计出的运动目标参数校正相位误差即可得到 GMTI 图像. 所提方法有效地发挥了 FrFT 优良的抗噪性能和 DPCA 稳健的杂波对消能力, 能够获得不同杂波环境、不同 SNR 条件下的精确的 SAR-GMTI 图像. 仿真实验结果证明了所提方法的有效性.

**关键词:** 合成孔径雷达; 地面运动目标指示; 三通道; 相位中心偏置天线; 分数阶傅里叶变换

**中图分类号:** TN957.52      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-2091-07

## Study on DPCA-FrFT Based Multi-Channel SAR-GMTI

LIU An-na<sup>1,2</sup>, CHEN Li<sup>2</sup>, ZHAO Fei<sup>2</sup>, KUANG Gang-yao<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** A new multi-channel SAR-GMTI algorithm based on DPCA-FrFT is proposed, which can work on raw data and SAR image. According to the chirp characteristic of DPCA signal, we introduce the FrFT to detect the moving target and estimate the position, velocity and radial acceleration of the moving target, which lead to an overall and accurate description on motion parameters. Then according to the parameters, we apply the FrFT to compress the raw data on azimuth direction, or repositioning and focusing the moving target in the original SAR image. The proposed approaches take the full advantage of the excellent antinoise ability of the FrFT and ideal clutter cancellation of DPCA technique, and an exact SAR-GMTI image can be acquired in a clutter-rich and low SNR environment. The results of the simulation indicate the efficiency and availability of the methods.

**Key words:** SAR; GMTI; multi-channel; DPCA; FrFT

## 1 引言

地面运动目标指示(Ground Moving Target Indication, GMTI)是合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)实现空间对地观测的主要方面,具有重要的理论价值和迫切的实际需求. 目前世界各国已装备或研制试验中的 SAR 系统,大多数采用简单的双通道或三通道相位中心偏置天线技术(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)、沿航迹干涉技术(Along-Track Interferometry, ATI)来实现 GMTI 功能<sup>[1-3]</sup>. DPCA 的杂波抑制性能稳健,但对噪声敏感<sup>[4]</sup>. 在信噪比较低的环境中,无法在图像域或原始数据域检测弱目标,且 DPCA 通常需要结合其它方法实现参数估计. 另一方面,ATI 对噪声稳健,对杂波敏感<sup>[4]</sup>,同时具有检测和参数估计功能,但其参数估计个数有限,在三通道条件下无法估计目标的加速度<sup>[5]</sup>.

近年来,分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FrFT)在 SAR 信号处理领域引起了广泛关注<sup>[6]</sup>. 在 GMTI 系统中,FrFT 不仅能够检测运动目标,精确估计运动目标的信号参数,而且可以用于 SAR 成像<sup>[7,8]</sup>. 作为一种广义的 Fourier 变换<sup>[9]</sup>,FrFT 对 chirp 信号的分析具有独特的优越性,避免了非线性时频分析方法(如 WVD 方法)的交叉项干扰<sup>[10]</sup>. 因而,许多学者对其在多通道系统的应用展开了研究. S Chiu 等人提出在原始数据域由 DPCA 检测运动目标,并在获取先验距离门信息的基础上,利用 FrFT 对双通道信号聚集能量再进行 ATI 估计以提高信杂比<sup>[3]</sup>. 高飞提出的 DPCA-FrFT-ATI 方法在 Chiu 的基础上将其用途进行了扩展,采用 ATI 进行检测和估计,提高检测性能<sup>[11]</sup>. 孙华东提出的 DPCA-FrFT 参数估计方法和 STAP-FrFT-DPCA 方法也分别在一定程度上解决了速度估计和弱目标检测问题<sup>[12,13]</sup>. 但上述算法都

无法实现对加速度估计和弱目标检测的二者兼顾。

为解决上述问题,本文对 DPCA 和 FrFT 方法进行了深入研究,从二者特性出发,分别在原始数据域和图像域构造了一种基于 DPCA-FrFT 的三通道 SAR 慢动目标检测、测速、定位和成像方法,实现了径向加速度估计和弱目标检测的二者兼顾.本文方法的设计基于 DPCA 信号的 chirp 特性,考虑到 FrFT 对 chirp 信号的良好检测和参数估计效果,引入 FrFT 的抗噪能力<sup>[14]</sup>,以弥补 DPCA 对噪声敏感的缺陷。

## 2 原始数据域 DPCA-FrFT 法

### 2.1 原始数据域 DPCA 信号的 chirp 特性

假设三孔径天线的收发模式如图 1 所示,采用单孔径发射、全孔径接收的方式.考虑到 GMTI 的关键是方位信号处理,因此,基于原始数据域的 DPCA 方法通常是基于距离压缩后的多普勒子图,即在方位信号上进行杂波对消。

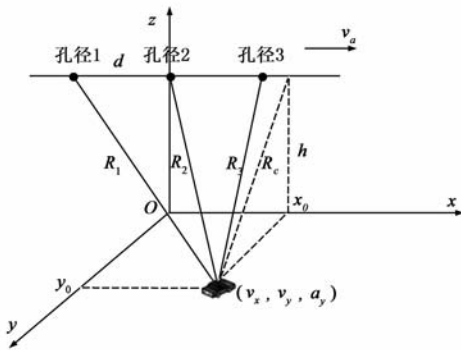


图1 三通道DPCA系统

将接收的三通道数据距离压缩和距离方位去耦合后,将方位信号用于三通道 DPCA 杂波抑制.以中间孔径 2 为基准,对孔径 1、3 进行多普勒频移补偿和时间校准,将补偿后的三通道数据两两对消.考虑径向加速度的影响,并忽略  $R_1, R_2, R_3$  在  $t = 0$  处的三次及三次以上的泰勒展开项,令  $\sigma(x_0) = GT_0 \sqrt{\delta(x_0, R_c)} \cdot \text{sinc}(k_r(t' - \tau_2) T_0)$ ,经整理后得到两两对消后的原始数据时域 DPCA 信号

$$\begin{aligned}
 s_{21}(t) &\approx \sigma(x_0) \cdot (1 - \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} v_r m T)) \\
 &\cdot \exp\{-j \frac{4\pi}{\lambda} [R_c + v_r t + \frac{1}{2} a_r t^2 \\
 &+ \frac{x_0^2 + d^2/4 + (v_a - v_x)^2 t^2 - 2x_0 t \cdot (v_a - v_x) + v_r^2 t^2}{2R_c}]\} \\
 s_{32}(t) &\approx \sigma(x_0) \cdot (1 - \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} v_r m T)) \\
 &\cdot \exp\{-j \frac{4\pi}{\lambda} [R_c + v_r t + \frac{1}{2} a_r t^2 \\
 &+ \frac{x_0^2 - x_0 d + d^2/2 + (v_a - v_x)^2 t^2 - 2x_0 t \cdot (v_a - v_x) + d v_a + v_r^2 t^2}{2R_c}]\}
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $v_r, v_x, a_r$  分别表示运动目标的径向、方位速度和径向加速度,  $x_0, y_0$  分别表示运动目标的初始方位和地面距离向位置,  $T_0$  为发射脉冲宽度,  $h$  为雷达飞行高度,  $m$  为正整数,飞行速度  $v_a$ 、相邻孔径间距  $d$  和发射脉冲重复频率 PRF 满足  $d = 2m \cdot v_a / \text{PRF}$ ,  $T = 1 / \text{PRF}$  且  $R_c^2 = y_0^2 + h^2$ 。

由式(1)可知:当  $v_r = 0$  时,有  $s_{21} = s_{32} = 0$ ,静止目标将被对消掉,而  $v_r \neq 0$  的运动目标信息将被保留下来.此时可根据距离门的数据幅度超过一定的门限获得动目标的距离门位置信息和快时间信息  $\hat{t}'_2$ .令

$$\begin{aligned}
 \phi_{10} &= -\frac{4\pi}{\lambda} (R_c + \frac{x_0^2 + d^2/4}{2R_c}), \\
 \phi_{20} &= -\frac{4\pi}{\lambda} (R_c + \frac{x_0^2 - x_0 d + d^2/2}{2R_c}) \\
 f_{d1} &= -\frac{2}{\lambda} (v_r + \frac{x_0(v_x - v_a)}{R_c}), \\
 f_{d2} &= -\frac{2}{\lambda} (v_r + \frac{(x_0 - d/2)(v_x - v_a)}{R_c}) \\
 A &= \sigma(x_0) \cdot (1 - \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} v_r m T)), \\
 k_d &= -\frac{2}{\lambda} (a_r + \frac{(v_a - v_x)^2 + v_r^2}{R_c})
 \end{aligned} \quad (2)$$

则(1)式可简化为

$$\begin{aligned}
 s_{21}(t) &\approx A \cdot \exp(j\phi_{10} + j2\pi f_{d1} \cdot t + j\pi k_d \cdot t^2) \\
 s_{32}(t) &\approx A \cdot \exp(j\phi_{20} + j2\pi f_{d2} \cdot t + j\pi k_d \cdot t^2)
 \end{aligned} \quad (3)$$

由上式可知,在忽略三次以上的高次项的前提下,三通道的原始数据域 DPCA 信号近似为 chirp 信号。

### 2.2 原始数据域 DPCA-FrFT 法

分数阶 Fourier 变换可以解释为 Fourier 变换的旋转算子,也可以理解为 chirp 基的分解.本质是信号在时-频平面内时间坐标轴绕原点逆时针方向旋转任意角度  $\alpha$  后构成的分数阶 Fourier 域  $u$  轴上的投影.对时-频面上的线性调频信号而言,存在一个最佳旋转角度使得能量在该分数阶 Fourier 域得到最大程度的聚集.因此,以角度  $\alpha$  为变量,通过对分数阶 Fourier 域作峰值二维搜索可以实现对 chirp 信号的检测,同时利用峰值点处的  $(\hat{\alpha}, \hat{u})$  与信号多普勒参数的对应关系实现参数估计,这就是利用 FrFT 检测 chirp 信号并估计参数的原理.此外,由于 FrFT 在达到峰值时其变换核中的二次项具有类似匹配滤波器的脉冲压缩功能,且在慢动目标情况下具有与之相当的性能<sup>[8]</sup>,因此可作为 SAR 成像的一种替代.其具体定义和性质可参考文献[15].

#### 2.2.1 动目标检测、参数估计

原始数据域 DPCA-FrFT 方法如图 2 所示.为了提高杂波、低信噪比条件下的慢动目标检测性能,根据获得的距离门先验信息,对两路原始数据域 DPCA 信号

$s_{21}$ 、 $s_{32}$ 在动目标所在的距离单元作 FrFT 峰值搜索,其中任意一路的搜索结果均可检测动目标。

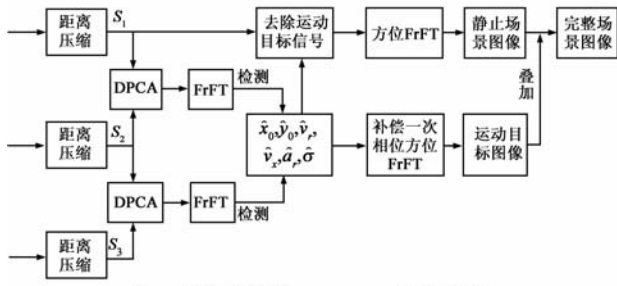


图2 原始数据域DPCA-FrFT法原理图

FrFT 检测的同时可以估计出两路 chirp 信号的多普勒中心频率和多普勒调频率,对 DPCA 信号  $s_{12}$  以  $\alpha$  为变量作分数阶 Fourier 变换:

$$\begin{aligned} S_{12}(u_1) &= F^\alpha[s_{21}(t)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} s_{21}(t) \sqrt{1 - j\cot\alpha} \cdot \exp[j\pi(t^2 + u_1^2)\cot\alpha \\ &\quad - j2\pi tu_1 \csc\alpha] dt = A \sqrt{1 - j\cot\alpha} \cdot \exp(j\phi_{10} + j\pi u_1^2 \cot\alpha) \\ &\quad \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp[j2\pi(f_{d1} - u_1 \csc\alpha)t + j\pi(k_d + \cot\alpha) \cdot t^2] dt \end{aligned} \quad (4)$$

为使积分后形式为 sinc 函数,二次项应当为 0,即  $k_d = -\cot\alpha$ .由此也可看出,FrFT 具有类似匹配滤波器的去线性调频项功能.此时式(4)可写为

$$\begin{aligned} S_{12}(u_1) &= F^\alpha[s_{21}(t)] \\ &= A \sqrt{1 - j\cot\alpha} \cdot \exp(j\phi_{10} + j\pi u_1^2 \cot\alpha) \\ &\quad \cdot \int_{-T_a/2}^{T_a/2} \exp[j2\pi(f_{d1} - u_1 \csc\alpha)t] dt \\ &= AT \sqrt{1 - j\cot\alpha} \\ &\quad \cdot \exp(j\phi_{10} + j\pi u_1^2 \cot\alpha) \text{sinc}[\pi T(f_{d1} - u_1 \csc\alpha)] \end{aligned} \quad (5)$$

当  $f_{d1} = u_1 \csc\alpha$  时,上式达到该域的峰值  $F = |AT \sqrt{1 - j\cot\alpha} \cdot \exp(j\phi_{10} + j\pi u_1^2 \cot\alpha)|$ .

综上所述,并考虑量纲归一化修正系数,通过峰值二维搜索  $(\hat{\alpha}, \hat{u}_1) = \arg \max_{\alpha, u_1} |S_{21\alpha}(u_0)|^2$ ,可得

$$\begin{aligned} \hat{f}_{d1} &= \text{PRF}/N \cdot \hat{u}_1 \csc\hat{\alpha}, \hat{k}_d = -\text{PRF}^2/N \cdot \cot\hat{\alpha}, \\ |\hat{A}| &= |\hat{F} \sqrt{N}/\csc\hat{\alpha}| \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $\alpha$  表示 FrFT 平面相对时-频面的旋转角度,  $u_1$  表示  $s_{12}$  的分数阶 Fourier 域,  $T_a$  表示合成孔径时间,上标符号表示估计值。

同理,将 DPCA 信号  $s_{23}$  作 FrFT 到  $(\hat{\alpha}, \hat{u}_2)$  域可得

$$\hat{f}_{d2} = \text{PRF}/N \cdot \hat{u}_2 \csc\hat{\alpha} \quad (7)$$

其中  $u_2$  表示  $s_{23}$  的分数阶 Fourier 域。

又由于  $x_0 \ll R_c$ ,根据天线孔径 2 的信号时延  $\hat{\tau}_2$  可得

$$\hat{R}_c \approx \hat{R}_2 = c \hat{\tau}_2/2 \quad (8)$$

利用  $\hat{\tau}_2$  处理通道 1 的数据,可根据幅度估计出  $\hat{\sigma}$ 。

将  $\hat{A}, \hat{\sigma}$  代入式(2)中的  $A = \sigma(x_0) \cdot (1 - \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} v_r mT))$  得

$$\hat{v}_r = \frac{\lambda}{4\pi mT} \cdot (2k\pi - a \tan(1 - \frac{\hat{A}}{\sigma})), k = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

此时得到一组以  $\lambda k/2mT$  为周期的  $\hat{v}_r$ .考虑  $x_0, v_x, v_a \ll R_c$ ,则式(2)中  $f_{d1} \approx -\frac{2}{\lambda} v_r$ ,即  $\hat{v}_r \approx -\frac{\lambda}{2} \hat{f}_{d1}$ ,根据这个近似值可以估计真实径向速度  $v_r$  所在的周期  $k$ ,并代入式(9)确定最终估计值  $\hat{v}_r$ .由式(2)中的  $f_{d1}, f_{d2}$  的表达式可计算得  $\hat{v}_x = \frac{(\hat{f}_{d2} - \hat{f}_{d1}) \lambda \hat{R}_c}{d} + v_a$ .将  $\hat{v}_r, \hat{v}_x, \hat{R}_c$  分别代入式(2)中的  $\hat{f}_{d1}, \hat{k}_d$  求得

$$\begin{aligned} \hat{x}_0 &= (\hat{v}_r + \frac{\lambda \hat{f}_{d1}}{2}) \cdot \frac{\hat{R}_c}{v_a - \hat{v}_x} \\ \hat{a}_r &= -\frac{(v_a - \hat{v}_x)^2 + \hat{v}_r^2}{\hat{R}_c} - \frac{\lambda \hat{k}_d}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

最后由  $R_2^2 = x_0^2 + y_0^2 + h^2$  计算得  $\hat{y}_0 = \sqrt{\hat{R}_2^2 - \hat{x}_0^2 - h^2}$ .

### 2.2.2 方位压缩成像

在估计出动目标的参数后,取距离压缩的通道 1 的回波数据  $s_1$  进行方位压缩成像.首先构造相应的动目标回波:

$$\hat{s}_{\text{mov}} = \hat{\sigma} \cdot \exp(j\hat{\phi}_m + j2\pi\hat{f}_{dm}t + j\pi\hat{k}_{dm}t^2) \quad (11)$$

$$\hat{\phi}_m = -\frac{4\pi}{\lambda} (\hat{R}_c + \frac{(\hat{x}_0 + d)^2}{2\hat{R}_c}),$$

其中

$$\hat{f}_{dm} = -\frac{2}{\lambda} (\hat{v}_r + \frac{(\hat{x}_0 + d)(v_a - \hat{v}_x)}{\hat{R}_c}),$$

$$\hat{k}_{dm} = -\frac{2}{\lambda} (\hat{a}_r + \frac{(v_a - \hat{v}_x)^2 + \hat{v}_r^2}{\hat{R}_c})$$

则静止场景回波为

$$s_{\text{back}} = s_1 - \hat{s}_{\text{mov}} = \sigma \cdot \exp(j\phi_b + j2\pi f_{db}t + j\pi k_{db}t^2) \quad (12)$$

$$\phi_b = -4\pi/\lambda (R_c + (x_0 + d)^2/2R_c),$$

其中

$$f_{db} = -2(x_0 + d)v_a/\lambda R_c,$$

$$k_{db} = -2v_a^2/\lambda R_c$$

根据已知的雷达系统参数  $v_a$  和  $\hat{R}_c$  求得最佳旋转角度  $\alpha_b = \text{arccot}v_a^2/\lambda \hat{R}_c$ ,作 FrFT 得静止场景的 SAR 图像  $S_{\text{back}}(u) = F^{\alpha_b}[s_{\text{back}}(t)]$

$$\begin{aligned} &= \sigma T_a \csc\alpha_b \cdot e^{j\phi_b + j\pi u^2 \cot\alpha_b} \cdot \text{sinc}[\pi T_a(f_{db} - u \csc\alpha_b)] \end{aligned} \quad (13)$$

对通道 1 提取的动目标回波  $\hat{s}_{\text{mov}}$ ,可根据参数先补偿多普勒中心频率造成的一次相位误差,参考函数为

$$C_{\text{error1}} = \hat{\sigma} \cdot \exp(j4\pi/\lambda (\hat{v}_r t + (\hat{x}_0 \hat{v}_x t + d\hat{v}_x t)/2\hat{R}_c))$$

则

$$\hat{s}'_{\text{mov}} = \hat{s}_{\text{mov}} \cdot C_{\text{error1}} = \hat{\sigma} \cdot \exp(j\hat{\phi}_m + j2\pi\hat{f}_{dm}t + j\pi\hat{k}_{dm}t^2) \quad (14)$$

由于  $\hat{k}_{dm} = \hat{k}_d$ , 根据  $S_{21}(u_1)$  的角度  $\hat{\alpha}$  对其方位 FrFT 得到动目标的 SAR 图像:

$$S_{\text{mov}}(u) = F^{\hat{\alpha}}[\hat{s}'_{\text{mov}}(t)] = \hat{\sigma} T_a \text{csc} \hat{\alpha} \cdot e^{j\hat{\phi}_m + j\pi u^2 \cot \hat{\alpha}} \cdot \text{sinc}[\pi T_a(\hat{f}_{db} - u \text{csc} \hat{\alpha})] \quad (15)$$

最后叠加  $S_{\text{backg}}$ ,  $S_{\text{mov}}$  两幅图像即可得到完整的 SAR-GMTI 图像.

### 3 图像域 DPCA-FrFT 法

#### 3.1 图像域 DPCA 信号的 chirp 特性

异于原始数据域, 图像域 DPCA 信号是在采用静止目标的匹配滤波器进行方位压缩后再进行相位偏移补偿、时间校准和对消, 即对 SAR 图像的配准和对消. 实质是去除了由雷达平台运动产生的多普勒频率的线性调频项, 即对式(1)的两路信号与参考函数  $C(n) = \exp(-j\pi k'_d n^2)$  (其中  $k'_d = -2(v_d t)^2/\lambda R_c$ ) 卷积相乘, 经整理后分别为

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{21}(t) &\approx \tilde{A} \cdot \exp(j\hat{\phi}_{10} + j2\pi\tilde{f}_{d1} \cdot t + j\pi\tilde{k}_d \cdot t^2) \\ \tilde{s}_{32}(t) &\approx \tilde{A} \cdot \exp(j\hat{\phi}_{20} + j2\pi\tilde{f}_{d2} \cdot t + j\pi\tilde{k}_d \cdot t^2) \end{aligned} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{k}_d &= k_d k'_d / (k'_d - k_d), \tilde{f}_{d1} = f_{d1} k'_d / (k'_d - k_d), \\ \tilde{f}_{d2} &= f_{d2} k'_d / (k'_d - k_d), \tilde{A} = A / \sqrt{|k'_d - k_d|}, \\ \hat{\phi}_{10} &= \phi_{10} \cdot e^{j\pi/4}, \hat{\phi}_{20} = \phi_{20} \cdot e^{j\pi/4} \end{aligned} \quad (17)$$

由式(16)知图像域 DPCA 信号仍近似为 chirp 信号, 且同样可以获得动目标的距离门和快时间信息  $\hat{t}'_2$ .

#### 3.2 图像域 DPCA-FrFT 法

##### 3.2.1 动目标检测、参数估计

图像域 DPCA-FrFT 方法如图 3 所示. 由于  $\tilde{s}_{21}$ ,  $\tilde{s}_{32}$  与  $s_{21}$ ,  $s_{32}$  只存在多普勒参数数值的差异, 因此动目标的检测和参数估计方法类似于原始数据域法.

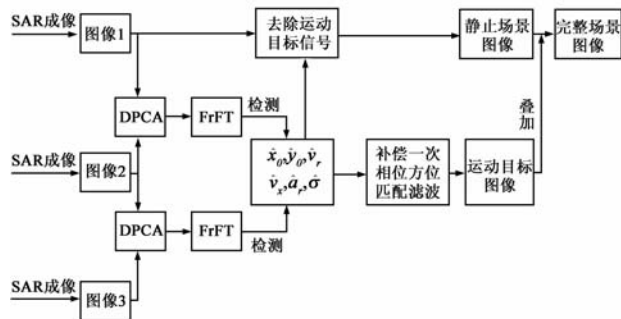


图3 图像域DPCA-FrFT法原理图

根据获得的距离门先验信息, 对两路图像域 DPCA 信号  $\tilde{s}_{21}$ ,  $\tilde{s}_{32}$  分别在动目标的所在距离单元作 FrFT 峰值搜索, 其中任意一路均可检测动目标. 峰值二维搜索的同时可以估计出  $\tilde{s}_{21}$ ,  $\tilde{s}_{32}$  中的

$$\hat{f}_{d1} = \text{PRF}/N \cdot \hat{u}_1 \text{csc} \hat{\alpha}, \hat{k}_d$$

$$\begin{aligned} &= -\text{PRF}^2/N \cdot \cot \hat{\alpha}, |\hat{A}| \\ &= |\hat{F}/\sqrt{N} \text{csc} \hat{\alpha}| \end{aligned} \quad (18)$$

和

$$\hat{f}_{d2} = \text{PFR}/N \cdot \hat{u}_2 \text{csc} \hat{\alpha} \quad (19)$$

其中  $\hat{\alpha}$  表示 FrFT 平面相对时-频面的旋转角度,  $\hat{u}_1$  表示  $\tilde{s}_{21}$  的分数阶 Fourier 域,  $\hat{u}_2$  表示  $\tilde{s}_{32}$  的分数阶 Fourier 域, 上标符号表示估计值.

类比于原始数据域方法的参数估计步骤, 联立式(17)~(19), 可分步求解出  $\hat{\sigma}, \hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{v}_x, \hat{v}_r, \hat{a}_r$ .

##### 3.2.2 动目标在 SAR 图像中的重新定位、聚焦

不同于原始数据域法的是, 由于图像域已经采用静止匹配滤波器对回波进行了方位压缩, 我们只需对提取的运动目标信息进行位置校正和聚焦. 易知通道 1 提取动目标回波后的静止场景 SAR 图像为

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{\text{backg}}(t) &= \sigma T e^{j\hat{\phi}_b} \cdot \text{sinc}[\pi T_a(t - f_{db}/k_{db})] \\ &= \sigma T e^{j\hat{\phi}_b} \cdot \text{sinc}[\pi T_a(t - (x_0 + d)/v_a)] \end{aligned} \quad (20)$$

对通道 1 提取的动目标回波  $\tilde{s}_{\text{mov}}$ , 可根据参数先补偿多普勒中心频率造成的一次相位误差, 同样将  $\tilde{s}_{\text{mov}}$  乘以参考函数  $C_{\text{error}}$  得

$$\hat{s}'_{\text{mov}} = \hat{\sigma} \cdot \exp(j\hat{\phi}_m + j2\pi\hat{f}_{db}t + j\pi\hat{k}_d t^2) \quad (21)$$

构造相应的频域匹配滤波器  $\exp(-j\pi f_t^2/\hat{k}_d^2)$ , 则动目标的 SAR 图像为:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{\text{mov}}(t) &= \text{ifft}(\text{fft}(\hat{s}'_{\text{mov}}) \cdot \exp(-j\pi \frac{f_t^2}{\hat{k}_d^2})) \\ &= \hat{\sigma} T e^{j\hat{\phi}_b} \cdot \text{sinc}[\pi T_a(t + \frac{\hat{f}_{db}}{\hat{k}_d})] \end{aligned} \quad (22)$$

最后叠加  $\tilde{s}_{\text{backg}}$ ,  $\tilde{s}_{\text{mov}}$  即可得到完整的 SAR-GMTI 图像.

### 4 仿真实验结果与分析

本节分三个部分分别对动目标检测、参数估计和成像进行了仿真实验验证. 在检测部分分别对本文的原始数据域检测方法和图像域检测方法在不同 SCR、SNR 环境下进行了仿真实验验证, 并与经典的原始数据域域 DPCA 和图像域 DPCA 检测结果进行了对比; 在参数估计部分, 给出了两种方法无杂波、噪声条件下的参数估计结果和 SCR = -10dB、不同信噪比条件下的主要参数估计误差; 最后根据参数估计结果, 分别采用两种算法在无杂波、噪声条件下进行了方位压缩成像和 SAR 图像的重新定位、聚焦.

首先设定实验的系统和目标参数: 假设杂波背景服从瑞利分布, 加性噪声服从复高斯分布, 算法仿真的系统和目标参数设置如表 1、2 所示.

表 1 系统参数设置

雷达工作距离	4000m	发射脉冲宽度	1 $\mu$ s
载机飞行速度	76m/s	发射信号带宽	180MHz
载机飞行高度	1500m	发射信号载频	3GHz
合成孔径时间	3.1579s	A/D 采样率	216MHz
孔径间距	3.34m	脉冲重复频率	182Hz
天线尺寸	1.5m $\times$ 1m	地面场景大小	510 $\times$ 574(像素)
距离向分辨率	1m	方位向分辨率	1m
距离向分辨率	1.2	方位向分辨率	1.2
加权因子		加权因子	

表 2 目标参数设置

目标参数	径向速度 (m/s)	方位速度 (m/s)	径向加速度 (m/s <sup>2</sup> )	距离位置 (像素)	方位位置 (像素)
动目标 1	-4	-8	2	252	288
动目标 2	1	0	0.5	324	408
静止目标 1	0	0	0	108	288
静止目标 2	0	0	0	396	157

4.1 动目标检测结果

利用通道 1,2 的原始数据或图像来进行检测,4 种方法的检测性能分别如图 4,5 所示.其中分数阶傅里叶阶数取  $p = 2\alpha/\pi + 1, \alpha \in (-\pi, \pi)$ .

从图 4 可以看出,在无杂波和噪声条件下,原始数据域 DPCA、图像域 DPCA 和本文提出的两种方法均能清晰地检测出两个运动目标.而在 SCR = -10dB, SNR = -10dB 条件下,如图 5(a)、(d)所示,原始数据域 DPCA 和图像域 DPCA 三维图中两个运动目标均已完全淹

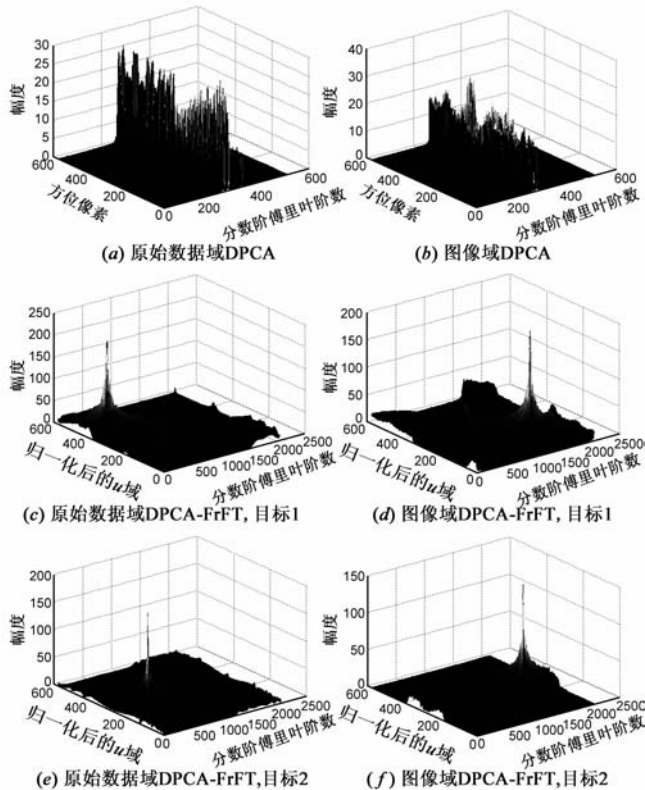


图 4 无杂波和噪声时的各种方法检测结果

没在杂波和噪声中,而新方法仍能检测出两个目标,如图 5(b)、(c)、(e)、(f)所示,且都具有较好的信干比(包括 SCR 和 SNR)性能.因此,新方法的检测性能既优于原始数据域 DPCA,又优于图像域 DPCA.另一方面,对散焦较明显的动目标 1,新方法中的原始数据域 DPCA-FrFT 法又略优于图像域 DPCA-FrFT 法.这是由于原始数据域信号没有经过静止匹配滤波器的聚焦,因而保留了更多的动目标信息,损失的 SCR 相对较小.而对于散焦不明显的动目标 2 而言,二者的性能则相当.

4.2 参数估计结果

无杂波、噪声条件下采用原始数据域 DPCA-FrFT 法和采用图像域 DPCA-FrFT 法估计的动目标 1,2 的各参数结果及误差分别如表 3、4 所示;SCR = -10dB、不同信噪比条件下的两种方法的主要参数估计误差如表 5 所示.其中  $k_{d1}, k_{d2}$  和  $\tilde{k}_{d1}, \tilde{k}_{d2}$  两对理论值分别相等,在实际搜索中存在略微差异,本文取二者均值作为最终估计值.结果表明,本文方法的参数估计精度较高,且对杂波和噪声都有较强的鲁棒性.以径向加速度  $a_r$  为例,两种方法的估计结果都较接近理论值,且其中原始数据域法对散焦较明显的动目标 1 的估计精度要优于图像域法,相对应的,对于散焦较小的动目标 2 而言,图像域法的结果则优于原始数据域法.

表 3 无杂波、噪声条件下原始数据域 DPCA-FrFT 法的动目标参数真实值和估计值

	目标 1		目标 2			
	理论值	估计值	偏差	理论值	估计值	偏差
A	8.557	8.422	-0.135	7.841	7.052	-0.789
$x_0$	0	1.360	1.360	50	57.392	7.392
$y_0$	3600	3597.402	2.598	3654.1	3653.243	-0.857
$v_x$	-8	-9.327	1.327	0	8.013	8.013
$v_r$	-4	-4.020	-0.020	1	1.303	0.303
$a_r$	2	1.981	-0.019	0.5	0.792	0.292
$\tilde{f}_{d1}$	80.000	80.004	0.004	-0.76	-0.765	-0.005
$\tilde{f}_{d2}$	78.561	78.541	-0.020	-2.045	-1.915	0.03
$k_{d1}$	-76.267	-76.573	-0.306	-39.251	-39.191	0.060
$k_{d2}$	-76.267	-77.560	-1.293	-39.251	-39.320	-0.069

表 4 无杂波、噪声条件下图像域 DPCA-FrFT 法的动目标参数真实值和估计值

	目标 1		目标 2			
	理论值	估计值	偏差	理论值	估计值	偏差
$\tilde{A}$	9.774	9.089	-0.685	3.049	2.906	-0.143
$\tilde{x}_0$	0	-4.151	-4.151	50	57.392	7.392
$\tilde{y}_0$	3600	3598.268	-1.732	3654.1	3653.675	-0.525
$\tilde{v}_x$	-8	-3.154	4.846	0	2.937	2.937
$\tilde{v}_r$	-4	-4.271	-0.271	1	0.740	0.260
$\tilde{a}_r$	2	2.265	-0.265	0.5	0.582	0.082
$\tilde{f}_{d1}$	-48.756	-48.366	0.390	2.115	3.324	1.209
$\tilde{f}_{d2}$	-47.880	-47.553	0.326	5.694	6.706	1.012
$\tilde{k}_{d1}$	46.481	46.462	0.019	109.305	108.443	-0.862
$\tilde{k}_{d2}$	46.481	46.462	0.019	109.305	108.826	-0.479

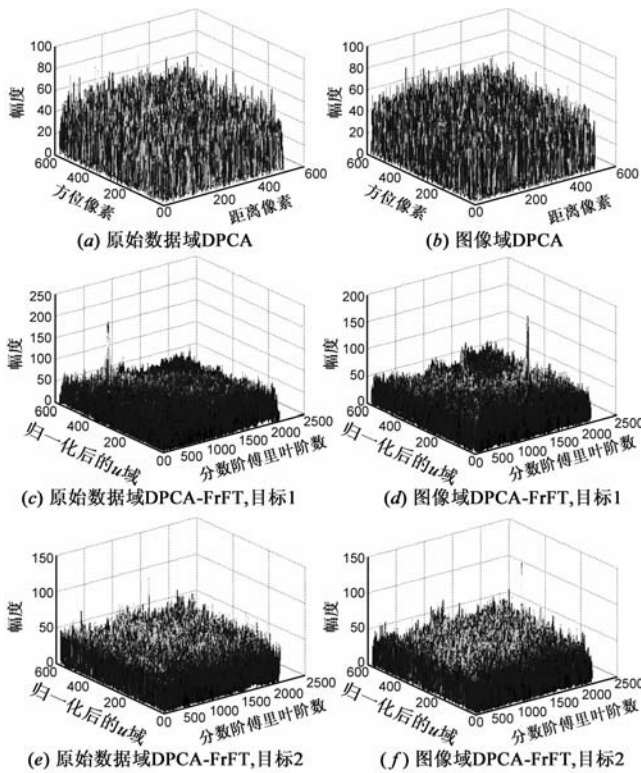


图5 SCR=-10dB,SNR=-10dB时的各种方法检测结果

### 4.3 成像结果

在无杂波和噪声条件下,根据表 1 的参数估计结果,本小节分别采用本文的原始数据域 DPCA-FrFT 法、图像域 DPCA-FrFT 法进行了方位压缩成像和运动目标的重新定位、聚焦,其结果和采用静止匹配滤波器方位压缩的常规 SAR 图像如图 6 所示.如图 6(a)所示,常规 SAR 图像中两个运动目标发生了明显的拖尾和散焦,而图 6(b)中采用本文的图像域法有效实现了对动目标的重新定位和聚焦,从图 6(c)可以看出,本文的原始数据域法也能够实现对运动目标和静止目标的清晰成像,且该方法采用的 FrFT 方位压缩成像具有更优的能量聚集效果.

表 5 SCR = -10dB,不同信噪比条件下的两种方法的多普勒参数误差 (按理论值的百分比计算)

SNR	$m_1$ (%)			$m_2$ (%)		
	0dB	-6dB	-10dB	0dB	-6dB	-10dB
$\Delta A$	-3.26	1.20	-1.63	3.64	9.20	-1.62
$\Delta \tilde{A}$	2.38	-13.41	9.52	6.72	8.46	17.91
$\Delta f_{d1}$	0.005	0.005	0.005	-0.75	-0.75	-0.75
$\Delta f_{d2}$	0.03	0.03	0.58	6.45	6.54	6.34
$\Delta k_d$	0.25	1.05	0.82	0.15	0.32	0.13
$\Delta \tilde{f}_{d1}$	-0.66	0.80	0.80	10.30	10.30	10.62
$\Delta \tilde{f}_{d2}$	0.68	0.68	0.68	19.50	19.50	19.50
$\Delta \tilde{k}_d$	0.75	0.040	0.040	0.43	0.62	0.65

## 5 结束语

针对强杂波、低信噪比环境下的慢动目标检测和径向加速度估计问题,本文基于 DPCA 信号的 chirp 特性,引入时频分析工具 FrFT,提出了一种新的基于 DPCA-FrFT 的三通道 SAR-GMTI 方法.新方法克服了 DPCA 对噪声敏感的不足,提高了动目标的检测性能,且实现了对包括径向加速度在内的运动目标参数的全面、准确估计.当工作在原始数据域时,新方法还实现了方位向脉冲压缩效果良好的 SAR-GMTI 成像,当工作在图像域时,新方法也实现了对动目标的精确定位和清晰聚焦.仿真实验结果验证了所提方法的正确性和有效性.

总之,本文从 DPCA 和 FrFT 的特性出发,得到了两种性能优越的 GMTI 方法.由于 FrFT 可以通过常规的傅里叶变换来实现<sup>[16]</sup>,计算量并不大,因此,与所优化的性能相比,本文方法所增加的计算量和复杂度的代价是微不足道的.

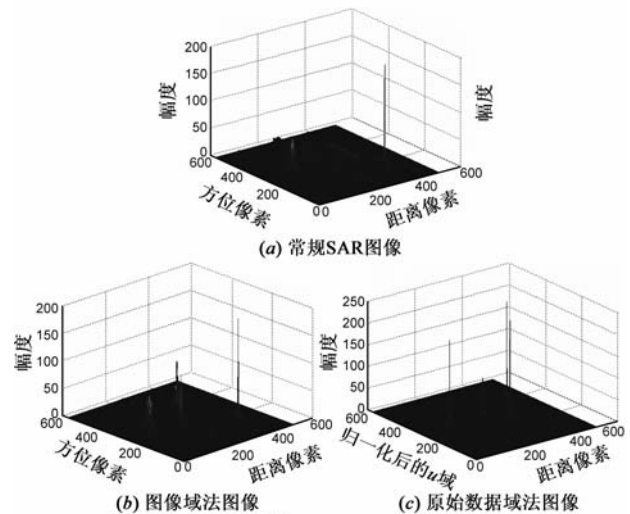


图6 方位压缩后的SAR-GMTI成像结果

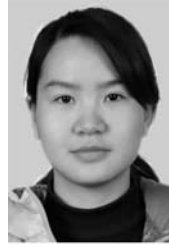
## 参考文献

- [1] Entzminger J N. JointSTARS and GMTI: past, present and future [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1999,35(2):748-761.
- [2] WH Long III, KA Harriger. Medium PRF for the AN/APG-66 radar [J]. Proceedings of the IEEE,73(2):1985.
- [3] S Chiu. Moving target parameter estimation for RADARSAT-2 MODEX [J]. International Journal of Remote Sensing,2010,31(15):4007-4032.
- [4] Fang Qin, Xiaoling Zhang, Min Dong. A method of hybrid ATI and DPCA technique to detect moving target [A]. Radar, 2006. CIE'06 [C]. Shanghai: US, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc,2007.

- [5] Mingjie Zheng, Ruliang Yang. A novel multi-channel SAR moving targets detection and image method [A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Toulouse, France: US, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003.
- [6] Tao Ran, Deng Bing, Wang Yue. Research progress of the fractional Fourier transform in signal processing [J]. Science in China; Series F Information Sciences, 2006, 49 (1): 1 - 25.
- [7] Sun Hongbo, Liu Guosui, Gu Hong, Su Weimin. Application of fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(3): 1416 - 1424.
- [8] Amein A S, Soraghan J J. A new chirp scaling algorithm based on the fractional Fourier transform [J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2005, 12(10): 705 - 708.
- [9] Almeida L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations [J]. IEEE Tran Signal Processing, 1994, 42(11): 3084 - 3091.
- [10] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [11] 高飞, 毛士艺, 袁运能, 玉振明. 基于原始数据域的星载双通道 SAR—GMTI 研究[J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2105 - 2110.  
Gaofei, Maoshiyi, Yuanyunneng, Yuzhenming. Study on raw data-based two aperture spaceborne SAR-GMTI [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2105 - 2110. (in Chinese)
- [12] Huang Sun, Fulin Su, Jianjun Gao, Xinghui Cao. Parameter estimations of SAR moving target based on DPCA-FrFT algorithm[A]. ICIEA 2007[C]. Harbin: US, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2007. 1779 - 1784.
- [13] 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 Donghua, Su Fulin, Zhang Ye. Research on SAR moving target detection and parameter estimations based on STAP-FrFT-DPCA[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(4): 1358 - 1363.
- [14] 刘建成, 刘忠, 王雪松, 肖顺平, 王国玉. 高斯白噪声背景下的 LFM 信号的分数阶 Fourier 域信噪比分析[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2337 - 2340.

- [15] 陶然, 齐林, 等. 分数阶 Fourier 变换的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 1 - 6.
- [16] Hadum M, et al. Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1996, 4(9): 2141 - 2150.

### 作者简介



刘安娜 女, 1983 年出生于湖南衡阳, 国防科技大学信息与通信工程专业硕博连读生, 主要从事雷达信号处理、SAR 运动目标检测、成像方面的研究工作。

E-mail: AnnaLiu@nudt.edu.cn



陈力 女, 1963 年出生于黑龙江, 北京跟踪与通信技术研究所研究员, 硕士生导师, 主要从事大地测量、航天工程总体等研究。



赵斐 男, 1974 年出生于, 北京跟踪与通信技术研究所高级工程师, 主要从事摄影测量、航天工程总体等研究。



匡纲要 男, 1966 年出生于湖南衡阳, 国防科技大学博士生导师, 教授, 主要从事雷达信号处理、SAR 图像判读、多光谱图像目标识别、雷达目标特性分析等研究。