

# 基于 DPCA-FrFT 算法的 SAR 运动目标参数估计

孙华东, 宿富林, 高建军, 张 晔

(哈尔滨工业大学 电子与信息技术研究院, 哈尔滨 150001)

**摘要:**在双通道的工作模式下,结合 DPCA 技术和分数阶傅立叶变换实现了对 SAR 运动目标的定位和两个方向(方位向和地面距离向)上速度的估计。首先建立了双通道 SAR 系统对运动目标的回波信号模型,阐述了动目标 DPCA 信号为线性调频信号这个特点,并且根据这个特点采用了分数阶傅立叶变换对其进行检测和参数估计。由于 DPCA 技术具有良好的杂波对消功能以及 FrFT 对 chirp 信号的良好检测效果,在不同信噪比情况下,DPCA-FrFT 算法都能有效地抑制静止背景、获得良好的测速和定位效果。仿真结果证明了该算法的正确性和有效性。

**关键词:**信息处理技术;雷达工程;SAR 运动目标检测;DPCA 技术;分数阶傅立叶变换

**中图分类号:**TN957.51 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)02-0476-07

## Parameter estimation of SAR moving target based on DPCA-FrFT algorithm

Sun Hua-dong, Su Fu-lin, Gao Jian-jun, Zhang Ye

(School of Electronics and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The localization and velocity estimation in both ground range direction and azimuth direction was realized by approach of combining DPCA technique with fractional Fourier transform (FrFT) in two aperture radar system. A moving point target echo model of two aperture SAR system was established and linear frequency modulated characteristics of the moving target DPCA signal was elaborated. On the basis of this property, FrFT was adopted to detect moving target and estimate parameters. Because of good capability of DPCA technique for clutter cancellation and nice effect of FrFT for chirp signal detection, simulation results show that the proposed DPCA-FrFT algorithm can suppress clutter and achieve localization and velocity estimation in different SNR conditions effectively.

**Key words:** information processing; radar engineering; SAR moving target detection; DPCA technique; fractional Fourier transform

**收稿日期:**2007-01-05.

**基金项目:**“863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA701413-3);武器装备预研一般基金项目(9140A21040206HT01).

**作者简介:**孙华东(1980-),男,博士研究生.研究方向:雷达信号处理. E-mail:kof97\_sun@163.com

**通讯联系人:**宿富林(1965-),男,副教授.研究方向:SAR/ISAK 成像,信号处理. E-mail:SFL-hit@163.com

合成孔径雷达是一种全天时、全天候的高分辨率微波成像雷达,传统的 SAR 不具备对运动目标的检测和成像能力,动目标只能以模糊的形式叠加在静止目标图像上。具有地面距离向速度分量的动目标在静止目标 SAR 图像上的方位位置将偏离其真实方位位置,具有方位向速度分量的动目标在静止目标 SAR 图像上将出现方位向散焦现象<sup>[1]</sup>。同时获取静止场景及运动目标检测与成像的结果是军事和民用领域对新体制 SAR 提出的一个迫切要求,并已成为广泛关注的热点。

在地杂波抑制方面,主要有偏置相位中心天线(DPCA)技术和时空二维自适应处理技术(STAP)。虽然 STAP 拥有最优的杂波抑制性能,但其运算十分复杂,工程上很难实现<sup>[2]</sup>。仅仅利用 DPCA 技术在双通道的工作模式下只能消除杂波,不能进行速度估计;三通道的 DPCA 也只能检测出地面距离向速度,无法得到方位向速度<sup>[3,4]</sup>。许多目前和将来的 SAR 系统仅限于两个平行的天线孔径,因此现阶段研究双通道的对消与参数估计是有意义的。

在参数估计方面,以 WVD(Wigner-Ville 分布)为代表的时频分布技术得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>。但在多运动目标存在的情况下,其固有的交叉项干扰将严重影响目标的检测和参数估计。尽管通过一些技术可以在一定程度上抑制交叉项<sup>[6]</sup>,但需要以增加计算量和牺牲分辨率作为代价。

近年来,分数阶傅立叶变换作为处理非平稳信号,尤其是 chirp 信号的一种强有力的工具,受到了广泛的关注。分数阶傅立叶变换在相应的分数阶 Fourier 域上对 chirp 信号具有最好的能量聚集性,这是因为分数阶 Fourier 核函数本身即为 chirp 信号,对 chirp 信号的检测结果几乎逼近于冲激函数。因此将分数阶 Fourier 变换应用到雷达运动目标检测中无疑是最合适的。文献[7]、[8]分析了利用 FrFT 检测 chirp 信号的理论依据;文献[9]、[10]详细分析了 FrFT 与 WVD 在多目标检测情况下的优劣,并且都实现了运动目标的检测,但没有实现具体运动参数(速度、位置)的估计。本文在前人工作的基础上,结合 DPCA 技术和 FrFT,实现了双通道条件下的杂波对消和动目标具体运动参数的估计。

## 1 SAR 运动目标 DPCA 信号分析

双通道 DPCA 系统常见的天线配置有三种,

不同的配置方式有其各自的优缺点。本文采用单发双收的配置方式。假设 SAR 处于正侧视工作状态,其中子孔径 A 发射脉冲重复周期为 PRT 的线性调频信号,子孔径 A 和 B 分别接收回波信号。子孔径 A、B 和运动目标的几何关系如图 1 所示。其中  $V$  为载机运动速度; $H$  为载机飞行高

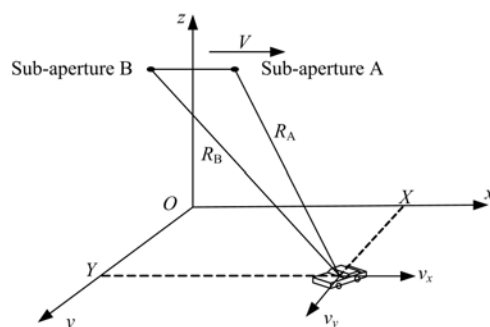


图 1 几何关系

Fig. 1 Geometry relationship

度; $d$ 为两个子孔径的距离,并且满足条件  $d = 4n \cdot PRT \cdot V$ ;  $(X, Y)$  为运动目标的初始位置; $v_x$ 、 $v_y$  分别为运动目标的方位向速度和地面距离向速度。

记  $R_0 = \sqrt{X^2 + Y^2 + H^2}$ ,那么  $t$  时刻子孔径 A 和目标的距离表示为

$$R_A(t) = \sqrt{\left[\frac{d}{2} - X + (V - v_x)t\right]^2 + (Y + v_y t)^2 + H^2} \approx R_0 + \frac{(V - v_x)^2 + v_y^2}{2R_0} t^2 + \frac{Yv_y + (d/2 - X)(V - v_x)}{R_0} t \quad (1)$$

子孔径 A 接收的回波信号为

$$S_A(t, \tau) = \sigma \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R_A(t)/C}{T_r}\right] \exp[j\pi K_r \cdot (\tau - \frac{2R_A(t)}{C})^2] \text{rect}\left[\frac{t}{T}\right] \exp\left[-\frac{2\pi j}{\lambda} \cdot 2R_A(t)\right] \quad (2)$$

式中: $C$ 为光速; $t$ 为方位向时间(慢时间); $\tau$ 为距离向时间(快时间); $T$ 为合成孔径时间; $T_r$ 和  $K_r$ 分别是雷达发射信号的脉冲宽度和调频率; $\sigma$ 为目标反射系数,是与接收发射天线增益和目标雷达散射截面积有关的常数。

采用 RD 算法对回波数据进行处理,则经过距离压缩后,子孔径 A 的接收信号为

$$SR_A(t, \tau) = \sigma T_r \exp\left[-\frac{4\pi}{\lambda} j R_A(t)\right] \text{rect}\left[\frac{t}{T}\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{t}{T}\right] \text{sinc}\left[\pi |K_r| T_r \left(\tau - \frac{2R_A(t)}{C}\right)\right] \quad (10)$$

$$\text{sinc}\left[\pi |K_r| T_r \left(\tau - \frac{2R_A(t)}{C}\right)\right] \quad (3)$$

同理,  $t$  时刻子孔径 B 和目标的距离可表示为

$$R_B(t) \approx R_0 + \frac{(V - v_x)^2 + v_y^2}{2R_0} t^2 + \frac{Yv_y - (d/2 + X)(V - v_x)}{R_0} t \quad (4)$$

经过距离压缩后, 子孔径 B 的接收信号为

$$SR_B(t, \tau) = \sigma T_r \exp\left\{-\frac{2\pi}{\lambda} j [R_A(t) + R_B(t)]\right\} \cdot \text{rect}\left[\frac{t}{T}\right] \text{sinc}\left[\pi |K_r| T_r \left(\tau - \frac{R_A(t) + R_B(t)}{C}\right)\right] \quad (5)$$

可见, 经过距离压缩后, 目标在距离向上实现了聚焦。因为 sinc 函数在最大值附近变化很小, 并且  $R_A(t) \approx R_B(t)$ , 因此, 在峰值所对应的快时刻  $\hat{\tau} = 2R_A(t)/C$  附近可以认为式(3)和式(5)中后面的 sinc 函数近似相等。

记

$$K_d = -\frac{2[(V - v_x)^2 + v_y^2]}{\lambda R_0} \quad (6)$$

$$f = -\frac{2[Yv_y - (X - d/4)(V - v_x)]}{\lambda R_0} \quad (7)$$

$$\phi_0 = -\pi K_a n^2 \cdot PRT^2 + \frac{\pi d(V - v_x) n \cdot PRT}{\lambda R_0} - \frac{4\pi R_0}{\lambda} + \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

经过 DPCA 处理的信号可以表示为

$$S_{\text{dPCA}}(t, \tau) = SR_A(t - n \cdot PRT, \tau) - SR_B(t + n \cdot PRT, \tau) = 2\sigma T_r \sin\left\{\frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{(V - v_x)^2 + v_y^2}{R_0} \cdot (2tn \cdot PRT) - \frac{d(V - v_x)}{2R_0} t + \frac{2[Yv_y - (X - d/4)(V - v_x)]}{R_0} n \cdot PRT\right]\right\} \cdot \exp(j\pi K_a t^2 + 2j\pi ft + j\phi_0) \cdot \text{rect}\left[\frac{t}{T}\right] \text{sinc}\left[\pi |K_r| T_r \left(\tau - \frac{2R_A(t)}{C}\right)\right] \quad (9)$$

因为  $v_x \ll V, v_y \ll V, d \ll R_0, X \ll R_0$ , 则有  $(V - v_x)^2 + v_y^2 \approx V^2, V - v_x \approx V, (X - d/4)/R_0 \approx 0$ , 同时把 DPCA 条件  $d = 4n \cdot PRT \cdot V$  代入式(9), 整理得目标的 DPCA 信号为

$$S_{\text{dPCA}}(t, \tau) = 2\sigma T_r \sin\left[\frac{\pi Yd}{\lambda R_0 V} v_y\right] \cdot \exp(j\pi K_a t^2 + 2j\pi ft + j\phi_0) \cdot$$

可见, 对于静目标  $v_y = 0, S_{\text{dPCA}}(t, \tau) = 0$ , 这说明通过 DPCA 技术, 静止目标被完全对消; 而对于  $v_y \neq 0$  的动目标, 通过 DPCA 处理信号被部分对消。此外, 通过对 DPCA 信号峰值的搜索, 可以得到动目标信号所在距离门对应的快时间  $\tau$ , 进而得到动目标与子孔径 A 的距离。

忽略后面的 sinc 函数部分, 动目标 DPCA 信号可以简化为

$$S_{\text{dPCA}}(t) = 2\sigma T_r \sin\left[\frac{\pi Yd}{\lambda R_0 V} v_y\right] \cdot \exp(j\pi K_a t^2 + 2j\pi ft + j\phi_0) \text{rect}\left[\frac{t}{T}\right] \quad (11)$$

可见, 动目标的 DPCA 信号为线性调频信号。

## 2 基于 FrFT 的 SAR 动目标测速定位

### 2.1 分数阶傅立叶变换

分数阶傅立叶变换, 亦称角度傅立叶变换(AFT), 或旋转傅立叶变换(RFT)。作为一种广义的傅立叶分析方法, 可以解释为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  $\alpha$  后构成的分数阶傅立叶域  $u$  上表示信号的方法。特别地, 当算子旋转的角度为  $\pi/2$  时, 即旋转至频率轴, 此时的分数阶傅立叶变换等价于傅立叶变换; 当算子旋转角度为  $0$  或  $2\pi$  时, 分数阶傅立叶变换等价于原函数。在  $t$  域的函数  $f(t)$  的旋转角度为  $\alpha$  的分数阶傅立叶变换可表示为  $f_\alpha(u)$  或  $F^\alpha f(u)$ , 这是一个线性积分运算。其数学表达式为

$$f_\alpha(u) = \{F^\alpha[f(t)]\}(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_\alpha(u, t) f(t) dt, 0 < |\alpha| < \pi = \begin{cases} \sqrt{1 - j\cot\alpha} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[j\pi(t^2 + u^2)\cot\alpha - \frac{j2\pi tu}{\sin\alpha}] f(t) dt, & \alpha \neq n\pi \\ f(t), & \alpha = 2n\pi \\ f(-t), & \alpha = (2n \pm 1)\pi \end{cases} \quad (12)$$

分数阶傅立叶变换满足线性和旋转相加性。特别地, 旋转角度为  $\alpha$  的 FrFT 的逆变换是旋转角度为  $-\alpha$  的 FrFT。分数阶傅立叶变换的其他性质可参考文献[11]。此外, 利用 Ozaktas 提出的分解型快速算法, 离散 FrFT 的计算可以具有与 FFT 的计算相比

拟的计算量,二者的计算速度几乎相当<sup>[12]</sup>。

## 2.2 利用 FrFT 估计 DPCA 信号的多普勒参数和幅度

利用 FrFT 检测 DPCA 信号,必须在旋转角度  $\alpha$  以及由它所决定的分数阶傅立叶域  $u$  中对信号进行搜索。其基本原理是以旋转角  $\alpha$  为变量,对 DPCA 信号连续地进行 FrFT 变换,形成信号能量在分数阶傅立叶参数  $(\alpha, u)$  平面的二维分布,并在此平面上进行峰值点的二维搜索。对于某一合适的角度  $\hat{\alpha}$ ,信号的能量绝大部分集中在  $u$  域上以  $\hat{u}$  为中心的一个窄带内,呈现出明显的能量聚集;而在其他旋转角度下,信号能量聚焦不明显。这样就可利用  $(\hat{\alpha}, \hat{u})$  与信号多普勒参数的对应关系进行估计。其对应关系分析如下

记

$$A = 2\sigma T_r \sin \left[ \frac{\pi Y d}{\lambda R_0 V} v_y \right] \quad (13)$$

则信号  $S_{\text{dPCA}}(t)$  的旋转角度  $\alpha$  的 FrFT 为

$$\begin{aligned} F^\alpha S_{\text{dPCA}}(u) &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{dPCA}}(t) K_\alpha(t, u) dt = \\ & A \sqrt{1 - j \cot \alpha} \exp(j\pi u^2 \cot \alpha + j\phi_0) \cdot \\ & \int_{-T/2}^{T/2} \exp[j\pi(K_\alpha + \cot \alpha)t^2 + 2j\pi(f - u \csc \alpha)t] dt \end{aligned} \quad (14)$$

为了使式(14)的模值达到最大,要求被积函数中指数项的  $t^2$  项系数为 0,即满足  $K_\alpha = -\cot \alpha$ 。记  $B = A \sqrt{1 - j \cot \alpha} \exp(j\pi u^2 \cot \alpha + j\phi_0)$ ,当满足条件  $K_\alpha = -\cot \alpha$  时,式(14)变为

$$\begin{aligned} B \int_{-T/2}^{T/2} \exp[2j\pi(f - u \csc \alpha)t] dt = \\ BT \text{sinc}[\pi T(f - u \csc \alpha)] \end{aligned} \quad (15)$$

在满足  $f = u \csc \alpha$  时,式(15)取最大模值,此时

$$|F|_{\max} = |BT| = |A| T \sqrt{|\csc \alpha|} \quad (16)$$

在数字信号处理中,离散 FrFT 的实现一般采用由 Ozaktas 提出的分解型快速算法,这种算法将 FrFT 分解为信号的卷积形式,从而利用 FFT 来实现 FrFT。但是这种快速算法的运算机理决定了在进行 FrFT 数值计算前必须先对原始信号进行量纲归一化处理。为了计算处理方便,需要引入一个具有时间量纲的尺度因子,把时域和频域分别转化为无量纲的域。由于量纲归一化,  $(\alpha, u)$  与信号多普勒参数的对应关系需要进行修正,其具体的分析可以参考文献[11]和[12]。若搜索出的最佳 FrFT 参数为  $(\hat{\alpha}, \hat{u})$ ,考虑量纲归一化的影响,DPCA 信号的多普勒调频率和中心

频率估计值分别为

$$\hat{K}_a = \frac{\text{PRF}^2}{N} \cot \hat{\alpha} \quad (17)$$

$$\hat{f} = \frac{\text{PRF}}{N} \hat{u} \csc \hat{\alpha} \quad (18)$$

式中:  $N$  为 DPCA 信号长度; PRF 为雷达脉冲重复频率;  $\text{PRF}^2/N$  和  $\text{PRF}/N$  是量纲归一化引入的比例系数。

若在  $(\hat{\alpha}, \hat{u})$  域中信号对应的峰值为  $\hat{F}$ ,则同时可以得到 DPCA 信号幅度估计值为

$$|\hat{A}| = \frac{\hat{F}}{N} \frac{1}{\sqrt{|\csc \hat{\alpha}|}} \sqrt{\frac{N}{|\csc \hat{\alpha}|}} \cdot \frac{N}{N_0} = \left| \frac{\hat{F} \sqrt{N}}{N_0 \csc \hat{\alpha}} \right| \quad (19)$$

式中:  $N_0$  为 DPCA 信号中幅值在最大值 90% 以上那一部分信号所对应的长度。系数  $\sqrt{N/|\csc \hat{\alpha}|}$  是量纲归一化引入的加权;  $N/N_0$  是考虑当信号仅仅一部分为线性调频特征时,对幅度的修正,特别地,当  $N = N_0$  时,整个信号都满足线性调频特征。

## 2.3 位置和速度参数的估计

### 2.3.1 $R_0$ 的估计

从式(10)的分析可知,通过 DPCA 技术处理,静止背景被对消,动目标信息被留下来。本文对快时间域  $\tau$  所对应的距离门的数据进行搜索,当幅度超过一定的门限时,认为该距离门存在动目标。这样,动目标的个数以及各个动目标所在的距离门就可以搜索出来。因为目标运动速度较慢并且  $R_0$  较大,从式(1)中可知,  $R_A(t)$  的变化很小,并且有  $R_0 \approx R_A(t)$ 。根据式(10)的 sinc 函数部分,若搜索到某一动目标所在距离门对应的快时刻为  $\hat{\tau}$ ,则该目标初始斜距的估计为:  $\hat{R}_0 \approx R_A(t) = C \hat{\tau}/2$ 。

### 2.3.2 $\sigma$ 的估计

利用动目标所在距离门这个先验知识,对子孔径  $A$  距离压缩后的信号  $SR_A(t, \hat{\tau})$  进行处理,可以得到在快时刻  $\hat{\tau}$  信号的幅度为  $|SR_A(t, \hat{\tau})|$ 。从式(3)中可知,在  $|t| \leq T/2$  的时间段内,  $|SR_A(t, \hat{\tau})|$  为定值,恒等于  $\sigma T_r$ 。但是,由于回波受系统噪声的污染,  $|SR_A(t, \hat{\tau})|$  不再固定,而在真实值附近变化。经过距离压缩后,回波信号的信噪比大大提高;对比压缩之前的回波,压缩后的信号受噪声污染程度很小。因此,可以对  $|t| \leq T/2$  内的信号  $SR_A(t, \hat{\tau})$  求幅度平均作为  $|SR_A(t, \hat{\tau})|$  的估

计。记所求得的幅度平均值为  $\widehat{SR}$ ，则动目标反射系数估计值  $\hat{\sigma} = \widehat{SR} / T_r$ 。

### 2.3.3 $d$ 的限制条件

为了使式(13)仅有一个关于  $v_y$  的解,还需要对孔径间距离  $d$  作限制,即要求正弦部分  $\pi Y d v_y / (\lambda R_0 V) \leq \pi / 2$ 。若系统最小可检测速度为  $V_{\min}$ ,则要求孔径间距离  $d$  满足  $d \leq \lambda R_0 V / (2 Y V_{\min})$ 。这样,利用估计出的 DPCA 信号参数  $\hat{K}_a$ 、 $\hat{f}$ 、 $\hat{A}$  和动目标参数  $\hat{R}_0$ 、 $\hat{\sigma}$ ,再联立式(6)、式(7)和式(12)就可以得到关于动目标的速度和位置的唯一解。图 2 为整个算法的流程图。

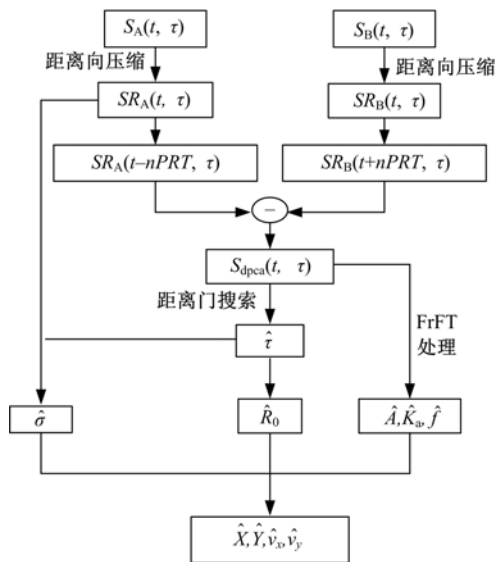


图 2 DPCA-FrFT 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the DPCA-FrFT algorithm

## 3 实验结果与分析

双通道 SAR 系统的主要参数如表 1 所示。在扫描范围内,采用两个静止目标作为背景,两个静目标的位置分别为 A(0 m, 10000 m), B(0 m, 10100 m),反射系数均为 1。动目标位置为(60 m, 10000 m),速度信息为  $v_x = 5$  m/s,  $v_y = 1.2$  m/s,目标反射系数也为 1。同时,在回波中加入 -3 dB 的高斯白噪声来仿真系统噪声,这里的信噪比定义为背景能量和动目标能量之和与噪声能量的比值。从文献[1]可知, RD 算法成像后动目标方位向位置偏移到  $60 - v_y Y / V = 0$ ,恰好与静目标 A 重合在一起,不利于检测。图 3 为子孔径 A 回波的成像结果,这里仅仅看到两个目标的像,这也证明了某一个静目标和动目标重合在一起。

表 1 系统主要参数

Table 1 Main parameters of the system

参 数	值	参 数	值
载机速度 $V/(m/s)$	200	信号带宽 $B/MHz$	30
飞行高度 $H/m$	5000	最小可检测速度 $V_{\min}/(m \cdot s^{-1})$	1
方位向扫描范围/m	-100~100	孔径间距 $d/m$	2.22
地面距离向扫描范围/m	9500~10500	天线长度 $D/m$	4
载波频率 $f_0/GHz$	10	方位向分辨率 $\delta x/m$	2
脉冲重复频率 PRF/Hz	721.5	距离向分辨率 $\delta R/m$	5
脉冲宽度 $T_r/\mu s$	5	地面距离向分辨率 $\delta y/m$	5.59

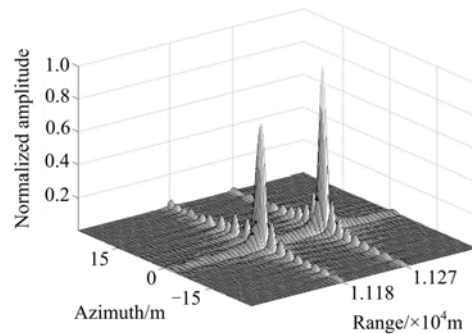


图 3 DPCA 处理前子孔径 A 回波的成像结果

Fig. 3 Imaging result of sub-aperture A before DPCA processing

为了评价 DPCA 系统的杂波对消性能,引入信噪比(SCR)的概念,即

$$SCR = 10 \lg(E_m / E_c) \quad (20)$$

式中:  $E_m$  为动目标能量;  $E_c$  为静止杂波能量。

在 DPCA 处理前,可以计算出  $SCR = -2.95$  dB; DPCA 处理后,得到  $SCR = 7.72$  dB。可见,经过 DPCA 处理后,系统的信噪比大大提高。图 4 是处理后的成像结果,此时静止目标被对消掉,

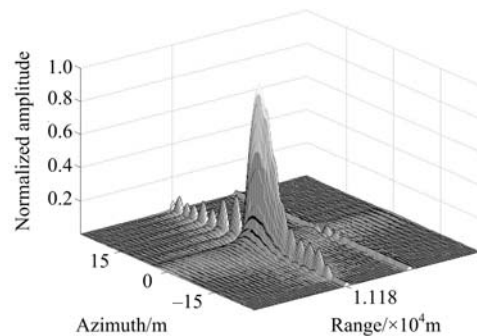


图 4 DPCA 处理后的成像结果

Fig. 4 Imaging result after DPCA processing

动目标信息被保留下来。由于采用静止目标对应的多普勒调频率进行方位压缩,所以动目标在方位向上并没有良好聚焦,并且方位位置也有偏移。

对 DPCA 信号进行峰值搜索,可以得到动目标所在距离门对应的快时刻为  $\hat{\tau}=74.545 \mu\text{s}$ ,进而可以得到动目标初始距离估计为  $\hat{R}_0=C \hat{\tau}/2=11182 \text{ m}$ 。利用先验知识  $\hat{\tau}$  对子孔径 A 的信号进行处理,可以得到动目标反射系数的估计值为  $\hat{\sigma}=|SR_{\Lambda}(t, \hat{\tau})|/T_r=0.991$ 。

图 5 为 DPCA 信号的实部以及 FrFT 处理的结果。当旋转角度  $\alpha$  为 1.1534 rad 时,在相应的分数阶傅立叶域,信号逼近为冲击函数。此时可得 DPCA 信号参数估计为:  $\hat{K}_a=-225.634 \text{ Hz}^2$ ,  $\hat{f}=-1.543 \text{ Hz}$ ,  $\hat{A}=9.2333 \times 10^{-6}$ 。联立以上条件可以得到动目标的速度和位置。表 2 为动目标真实运动参数与估计值的对比。可以看到,位置估计的偏差均在一个分辨单元之内,地面距离向速度相对偏差很小,方位向速度相对偏差不超过 10%,这说明用该算法取得了良好的运动参数估计结果。

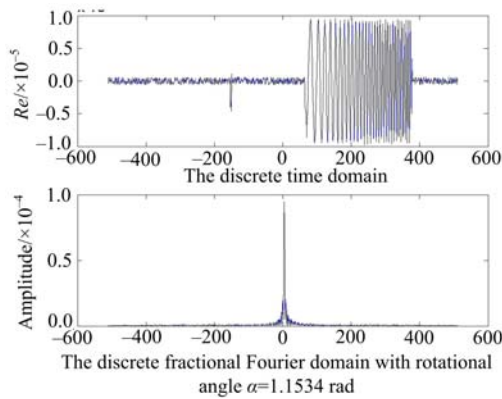


图 5 DPCA 信号实部与 FrFT 处理结果

Fig. 5 Real part of DPCA signal and the result of FrFT processing

表 2 运动目标的真实值与估计结果

Table 2 True values and estimations of the moving target

运动目标	真实值	估计值	偏差
$\sigma$	1	0.991	-0.009
X/m	60	58.62	-1.38
Y/m	10000	10002	2
$v_x/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5	5.46	9.20%
$v_y/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.2	1.16	3.33%
$K_a/\text{Hz}^2$	-226.743	-225.634	1.109
f/Hz	-2.434	-1.543	0.891

图 6 是利用估计出来的动目标多普勒调频率  $\hat{K}_a$  对子孔径 A 的回波数据重新成像的结果。可以看出,此时动目标和两个静目标完全分开,动目标实现了较为良好的聚焦,并且其方位位置也被很好地矫正过来。

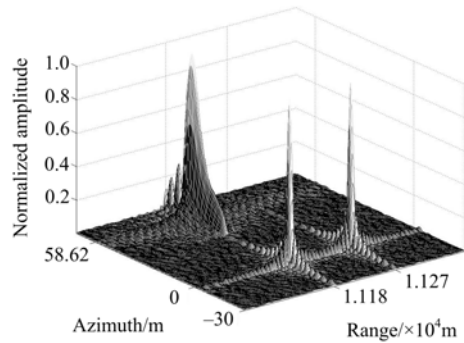


图 6 参数估计与方位位置校正后子孔径 A 成像的结果  
Fig. 6 Imaging result of sub-aperture A after parameter estimations and azimuth position revise

表 3 是系统噪声分别为 0、-6、-10 dB 情况下参数估计的偏差。从表中可以看出,在这三种情况下,地面距离向位置估计偏差相同,均小于一个地面距离分辨单元;方位向位置的估计偏差随着信噪比的降低略有增大;地面距离向速度的估计偏差始终不超过 10%;方位向速度的估计偏差仅仅在 -10 dB 情况下稍微超过 10%。总的来说,在这三种信噪比情况下,算法都取得了令人满意的参数估计结果。可见,利用 DPCA-FrFT 算法估计动目标运动参数具有良好的鲁棒性。

表 3 不同信噪比下的估计偏差

Table 3 Estimation deviations in different SNR

SNR/dB	0	-6	-10
$\Delta\sigma$	-0.005	0.020	0.059
$\Delta X/\text{m}$	-1.13	-3.01	-5.58
$\Delta Y/\text{m}$	2	2	2
$\Delta v_x/v_x$	8.40%	9.40%	11.80%
$\Delta v_y/v_y$	3.33%	5.00%	7.50%

## 4 结束语

仿真结果表明,在双通道的工作模式下,结合 DPCA 技术和 FrFT 能够实现动目标的检测,并且测速和定位也能达到相当高的精度。由于 DPCA 技术具有良好的杂波对消功能和 FrFT 对

chirp 信号良好的检测效果,将二者的优点相结合应用于动目标检测与参数估计无疑是合适的。从算法的理论分析可以看出,该算法仅仅利用两个通道的数据就实现了对动目标反射系数位置以及速度的估计。对比文献[3]、[4]的方法,该方法利用较少的数据实现了较多参数的估计。

#### 参考文献:

- [1] 李景文. 合成孔径雷达动目标检测与成像[D]. 北京:北京航空航天大学电子信息工程学院,1999.  
Li Jing-wen. Detection and imaging of moving targets with synthetic aperture radar [D]. Beijing: School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [2] Tim Nohara J. Comparison of DPCA and STAP for space-based radar [J]. IEEE International Radar Conference,1995(5):113-119.
- [3] 郑明洁,杨汝良. 基于 DPCA 和干涉技术的 SAR 动目标检测[J]. 电子与信息学报,2003,25(11):1525-1530.  
Zheng Ming-jie, Yang Ru-liang. SAR moving targets detection based on DPCA and interferometric processing[J]. Journal of Electronics and Information Technology,2003,25(11):1525-1530.
- [4] 魏俊,毛士艺,袁运能. 基于 DPCA、ATI 和 MUSIC 的动目标检测方法[J]. 系统工程与电子技术,2005,27(6):964-968.  
Wei Jun, Mao Shi-yi, Yuan Yun-neng. New GMTI algorithm based on DPCA, ATI and MUSIC[J]. Systems Engineering and Electronics,2005,27(6):964-968.
- [5] Barbarossa S, Farina A. A novel procedure for detecting and focusing moving objects with SAR based on the Wigner-Ville distribution [C] // IEEE International Radar Conference, Arlington, VA, USA, 1990.
- [6] Barbarossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform [J]. IEEE Trans Signal Process, 1995, 43(6):1511-1515.
- [7] 章步云,刘爱芳,朱晓华,等. 基于分数阶 Fourier 变换的多分量 LFM 信号检测和参数估计[J]. 数据采集与处理,2003,18(4):408-411.  
Zhang Bu-yun, Liu Ai-fang, Zhu Xiao-hua, et al. Multicomponent LFM signal detection and parameter estimation based on fractional Fourier transform [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003, 18(4):408-411.
- [8] 周刚毅,叶中付. 线性调频信号的调频斜率估计方法[J]. 中国科学技术大学学报,2003,33(1):34-38.  
Zhou Gang-yi, Ye Zhong-fu. An approach to estimate the chirp constant of LFM[J]. Journal of University of Science and Technology of China,2003,33(1):34-38.
- [9] 董永强,陶然,周思永,等. 基于分数阶傅立叶变换的 SAR 运动目标检测与成像[J]. 兵工学报,1999,20(2):132-136.  
Dong Yong-qiang, Tao Ran, Zhou Si-yong, et al. SAR moving target detection and imaging based on fractional Fourier transform [J]. Acta Armamentarii, 1999, 20(2):132-136.
- [10] Sun Hong-bo, Liu Guo-sui, Gu Hong, Su Wei-min. Application of fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4):1416-1424.
- [11] 陶然,齐林,王越. 分数阶 Fourier 变换的原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [12] Ozaktas H M. Digital computation of the fractional fourier transform [J]. IEEE Trans on SP, 1999, 47(5):1335-1347.