

# 基于三次相位补偿的运动目标参数估计

夏 猛<sup>1</sup>, 杨小牛<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学通信与信息工程学院 西安 710054; 2. 通信系统信息控制技术国家重点实验室 浙江 嘉兴 314003)

**【摘要】**针对加速度在合成孔径雷达运动目标检测中会产生三次相位影响静止目标抑制和参数估计精度的问题, 提出基于三次相位补偿的参数估计方法。在分析信号模型的基础上, 通过在时间-调频率平面内采用类似Dechirp和一维搜索的方法实现三次相位的补偿; 完成相位补偿后, 为克服某些时频分布中峰值重叠可能带来的目标丢失问题, 利用改进的分数阶傅里叶变换方法进行运动目标参数估计, 并给出了具体的参数估计方法。最后, 计算机仿真验证了该方法的正确性和有效性。

**关键词** 分数阶傅里叶变换; 运动目标检测; 参数估计; 相位补偿; 合成孔径雷达

中图分类号 TN957

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.04.006

## Parameter Estimation for Moving Target Based on Three-phase Compensation

XIA Meng<sup>1</sup> and YANG Xiao-niu<sup>2</sup>

(1. Communication and Information Engineering College, Xi'an University of Science and Technology Xi'an 710054;

2. National Key Laboratory of Information Control Technology for Communication System Jiaxing Zhejiang 314003)

**Abstract** Target acceleration of SAR moving target detection results in three-phase, and affects stationary target suppression and the precision of parameter estimation. Aiming at this problem, a parameter estimation method based on three-phase compensation is proposed. According to the analysis of signal model, phase compensation is achieved by dechirp and one-dimensional search in time-chirp distribution. After the phase compensation, in order to overcome potential problem of target loss caused by peak overlap in time-frequency distribution, an improved FrFT is employed for parameter estimation and the method is given in detail. Finally, the computer simulation confirms the correctness and validity of the method.

**Key words** FrFT; moving target detection; parameter estimation; phase compensation; SAR

基于合成孔径雷达(SAR)体制的运动目标检测与定位是当前国内外研究的热点, 随着研究的深入, 多通道方法以其良好的静止目标抑制能力和对慢速目标的检测能力被广泛应用, 相位中心偏置天线技术<sup>[1-2]</sup>(DPCA)和沿航迹干涉<sup>[3-4]</sup>(ATI)是实现运动目标检测的主要方法。当前, 对运动目标的分析均假设目标在距离向和方位向做匀速运动, 忽略了目标加速度对参数估计的影响。加速度带来的主要问题是使运动目标回波产生方位向上的三次相位, 进而影响到静止目标抑制效果和多普勒参数估计精度, 并最终使运动目标产生偏移和散焦现象。对运动目标进行聚焦成像, 需要获得精确的多普勒参数来构建匹配滤波器, 分数阶Fourier变换<sup>[5]</sup>由于从本质上克服了多目标交叉项的干扰问题, 被广泛应用于多普勒参数估计, 但在某些时频分布情况下会出现峰

值重叠现象<sup>[6]</sup>, 造成目标丢失问题。

针对上述问题, 本文将相位的非线性问题转换为线性问题, 提出了基于Dechirp思想和时间-调频率分布搜索的补偿方法。在完成相位补偿后, 使用改进的分数阶Fourier变换方法对运动目标的多普勒参数进行精确估计, 避免了由于调频率、起始频率相同但多普勒中心频率不同造成的峰值重叠问题。

### 1 三次相位的SAR运动目标回波模型

基于三次相位分析的SAR运动目标回波模型如图1所示, 沿航迹向均匀分布着两颗卫星 $S_1$ 和 $S_2$ , 初始坐标分别为 $(-d, 0, h)$ 和 $(0, 0, h)$ , 其中 $d$ 为基线长度,  $h$ 为卫星平台高度。同时, 场景中存在一个初始坐标为 $(0, y, 0)$ 的运动目标 $P$ ,  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $a_x$ 和 $a_y$ 分别为该目标的方位向速度、距离向速度、方位向

收稿日期: 2011-08-04; 修回日期: 2013-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(60572146)

作者简介: 夏猛(1981-), 男, 博士, 主要从事软件无线电技术、星载合成孔径雷达地面运动目标检测方面的研究。

加速度和距离向加速度。

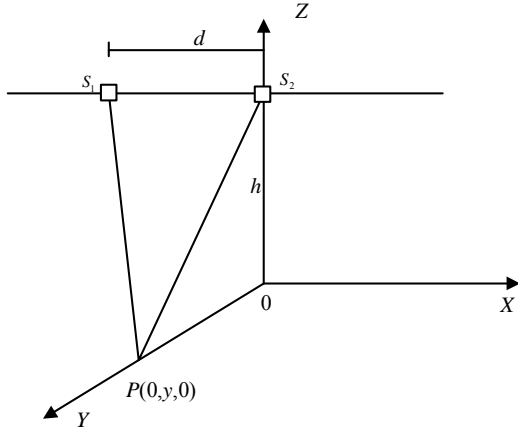


图1 运动目标回波模型

假设卫星平台均沿航迹向做速度为  $v_a$  的匀速运动，系统工作在正侧视模式下且满足DPCA约束条件。卫星  $S_2$  发射信号  $\exp(j2\pi(f_c \hat{t} + k\hat{t}^2/2))$ ，其中  $\hat{t}$  为快时间， $k$  为调频率， $f_c$  为载波频率， $S_1$  和  $S_2$  同时接收目标回波并进行处理。平台与目标的瞬时斜距  $R_i(t_m)$  经过泰勒展开后得到：

$$R_i(t_m) = R_0 + \frac{D_i^2}{2R_0} + \frac{yv_y + D_i(v_x - v_a)}{R_0} t_m + \frac{(v_x - v_a)^2 + v_y^2 + ya_y + D_i a_x}{2R_0} t_m^2 + \frac{(v_x - v_a)a_x + v_y a_y}{2R_0} t_m^3 \quad (1)$$

式中， $i=1,2$ ； $D_1=d$ ； $D_2=0$ ； $R_0=\sqrt{y^2+h^2}$ ； $t_m$  为方位向慢时间。由于星载平台的运行速度  $v_a$  一般都达到数千米每秒，所以当运动目标存在加速度时，斜距关于方位向慢时间的三次项对盲速分布、参数估计和聚焦成像带来的影响就不能忽略了。经过距离向压缩后的信号可以表示为：

$$S_i(\hat{t}, t_m) = \sigma \sin c \left( \Delta f_r \left( \hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c} \right) \right) \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} R_i(t_m) \right) \quad (2)$$

式中， $\sigma$  为信号幅度； $\Delta f_r$  为发射信号带宽； $\lambda$  为信号波长； $c$  为光速。两路回波经过时间  $\Delta t_m$  校正后，采用DPCA方法对静止目标进行抑制可以得到：

$$S_\Delta(\hat{t}, t_m) = S_2(\hat{t}, t_m) 2j \times \exp \left( -j \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{yv_y d}{R_0 v_a} - 2l(3t_m^2 \Delta t_m + 3t_m \Delta t_m^2 + \Delta t_m^3) \right) \right) \times \sin \left( \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{yv_y d}{R_0 v_a} - 2l(3t_m^2 \Delta t_m + 3t_m \Delta t_m^2 + \Delta t_m^3) \right) \right) \quad (3)$$

其中  $l = \frac{(v_x - v_a)a_x + v_y a_y}{2R_0}$ 。由式(3)可以分析出，由

于三次相位的存在，使得当  $v_y=0$  时，并不能完全将静止目标消除，此时运动目标检测的结果变为方位向时间的函数。同时，三次相位也使得检测盲速的分布变得更加复杂。可见，目标回波的三次相位会影响运动目标检测结果使已有的静止目标抑制方法失效，而且还会在后续的参数估计时产生严重的交叉项，影响方位向聚焦成像。

## 2 时频分析的相位补偿方法

为了能够实现对运动目标的检测和精确的多普勒参数估计，需要在回波完成距离向压缩和包络校正后对其在方位向上的三次相位进行补偿。否则，将会影响运动目标的参数估计和方位向聚焦成像。由于分数阶Fourier变换不会产生如WVD那样的多目标之间的交叉项而被用于多普勒参数估计，但是三次相位的存在会影响积分能量峰值使参数估计结果产生误差。方位向聚焦成像结果依赖于匹配滤波器的精确性，因此，三次相位会使得成像结果产生散焦和位置偏移。

假设回波已经完成距离向压缩和包络校正，并忽略常数相位，以式(2)所表示的通道1回波为例进行分析，即：

$$S_1(\hat{t}, t_m) = A \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} (\alpha t_m + \beta t_m^2 + \gamma t_m^3) \right) \quad (4)$$

式中， $A$  为回波包络校正后的信号幅度； $\alpha = \frac{yv_y + d(v_x - v_a)}{R_0}$  为相位关于方位向慢时间的一

次项系数； $\beta = \frac{(v_x - v_a)^2 + v_y^2 + ya_y + da_x}{2R_0}$  为相位关于

方位向慢时间的二次项系数； $\gamma = \frac{(v_x - v_a)a_x + v_y a_y}{2R_0}$

为相位关于方位向慢时间的三次项系数也称为信号的调频率变化率。如果不存在三次相位，即  $\gamma=0$ ，那么对于只具有二次相位的线性调频信号来说，对应的WVD为<sup>[7]</sup>：

$$W_s(t_m, f) = \delta(f + (2\alpha + 4\beta t_m)/\lambda) \quad (5)$$

式(5)表明只具有二次相位项的信号其时频分布在时频面上为线性；而具有三次相位的信号，对应的时频分布为非线性的关于时间的二次函数。因此，为了能够方便有效地分析三次相位信号，需要将非线性问题转换为线性问题来讨论，求式(4)中信号相位

$\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda} (\alpha t_m + \beta t_m^2 + \gamma t_m^3)$  关于慢时间的二次导数为：

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d^2\Phi}{d(t_m)^2} = -\frac{2}{\lambda}(2\beta + 6\gamma t_m) \quad (6)$$

所以, 求具有三次相位信号的时间-调频率分布, 即对信号的一阶导数求WVD得到:

$$W_s(t_m, f') = \delta(f' + (4\beta + 12\gamma t_m)/\lambda) \quad (7)$$

其中  $f'$  表示调频率的变化率。由式(7)得到信号的调频率变化率为方位向慢时间的函数而非常数, 同时可以分析出具有三次相位信号的时间-调频率分布是线性的, 即调频率变化率是随方位向慢时间线性变化的。因此, 可以采取与线性调频信号Dechirp处理相似的方法去除信号中的三次相位, 只不过参考信号是具有三次相位且调频率变化率未知的信号。

为此, 本文提出一种基于角度搜索的三次相位估计与补偿方法, 具体步骤为:

1) 目标回波先进行距离向压缩和回波包络校正, 其中包络校正方法可以采用广义二阶keystone变换, 文献[8]给出了具体实现方法。

2) 根据先验知识和所关心的动目标运动特征, 确定调频率变化率的范围  $\gamma_{\min}$  和  $\gamma_{\max}$  并构造三次相位参考函数  $\exp(j\frac{4\pi}{\lambda}\hat{\gamma}_n t_m^3)$ , 其中  $\hat{\gamma}_n = \gamma_{\min} + n\Delta l$ ,  $0 \leq n \leq N$ ,  $N = (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})/\Delta l$ ,  $\Delta l$  为搜索步进。

3) 将参考函数与式(2)相乘即  $S_i(\hat{t}, t_m) \exp(j\frac{4\pi}{\lambda}\hat{\gamma}_n t_m^3)$ , 并根据式(7)将其变换到时间-调频率平面。

4) 以  $\Delta l$  为步进重复步骤3), 会在时间-调频率平面上得到一族不同角度的直线, 而当  $\hat{\gamma}_n$  逼近  $\gamma$  时的直线斜率近似为零。

5) 求解上述直线族角度对应的斜率值, 即  $|\tan \theta_n| = |-12(\gamma - \hat{\gamma}_n)/\lambda|$ , 并对其进行最小值搜索, 当  $|\tan \theta_n|$  最小时信号的相位补偿效果达到最优。

此时, 经过补偿后的信号在方位向上表现为线性调频特性。这里需要说明的是, 三次相位补偿结果的精度主要受搜索步进的影响。一般可根据频率变化率的范围  $\gamma_{\min}$  和  $\gamma_{\max}$  以及所能承受的运算量来确定, 当范围较小时可以取较小的步进来获得精细的补偿结果; 当范围较大时可以采用粗、细两步的步进搜索方法, 即先由大步进确定一定的搜索范围后再利用小步进来进行细搜索。

### 3 改进分数阶Fourier变换的多普勒参数估计

通道回波在完成距离压缩、回波包络校正和三次相位补偿后, 进行DPCA静止目标抑制以获得运动

目标信息, 此时的运动目标回波在方位向上表现为线性调频信号, 为了实现运动目标的聚焦成像, 需要对目标回波进行精确的多普勒参数估计。Radon-Wigner变换<sup>[9]</sup>是一种对时变信号进行分析的有力工具, 是在噪声背景中对线性调频信号进行最大似然检测与估计的方法, 而信号  $x(t)$  的  $P$  阶分数阶傅里叶变换的模平方正好就是旋转角度上的Radon-Wigner变换。又由于分数阶Fourier变换从本质上克服了交叉项的干扰问题, 而且近年来出现了计算离散分数阶Fourier变换的有效算法, 因而被广泛运用与多普勒参数的精确估计。

在  $t$  域, 函数  $x(t)$  的  $P$  阶分数阶傅里叶变换是一个线性积分运算, 定义为<sup>[10-12]</sup>:

$$X_\alpha(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_p(t, u)x(t)dt \quad (8)$$

式(8)中的核函数为:

$$K_p(t, u) = \begin{cases} \sqrt{1 - j \cot \alpha} \exp(j\pi(t^2 + u^2) \cot \alpha) \times \\ \exp(-j2\pi ut \csc \alpha) & \alpha \neq n\pi \\ x(u - t) & \alpha = 2n\pi \\ x(u + t) & \alpha = (2n + 1)\pi \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $p$  为分数阶Fourier变换的阶数;  $\alpha$  为旋转角且  $\alpha = p\pi/2$ 。  $P$  阶分数阶傅里叶变换相当于信号(或函数)的Wigner分布在时间、频率平面上旋转一定角度后在频率轴  $u$  上的投影, 当旋转角度合适时, 就能得到线性调频信号能量高度聚集的分数阶傅里叶域分布。当取得某一合适的旋转角度时, 在  $u$  域上能形成明显的能量峰值, 而在其他角度下无能量聚集。此时, 只要对该量谱进行峰值点的二维搜索就能得到信号多普勒参数的估计值。

分数阶Fourier变换可以精确地估计出信号的多普勒起始频率和调频率, 但只有当信号的时频分布中心在  $t=0$  时, 多普勒中心频率和起始频率才会相等。因此, 在SAR运动目标参数估计中会存在两信号的方位向多普勒起始频率相同、调频率相同, 但由于目标的位置和运动特性不同造成各自的时频分布中心不同, 即多普勒中心频率不同。此时, 利用分数阶Fourier变换进行参数估计时在  $u$  域上却只会得到一个能量峰值, 从而造成目标丢失现象。下面具体分析, 如存在两信号:

$$\begin{cases} x_1(t) = \exp(j2\pi(f_1 t + kt^2/2)) \\ x_2(t) = \exp(j2\pi(f_2 t + kt^2/2)) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $k$  为调频率;  $f_1$  和  $f_2$  分别为各自的起始频率且  $f_1 = f_2$ 。  $x_1(t)$  的频率区间为  $(f_1 + k\tau_1, f_1 + k(T +$

$\tau_1)$ ,  $x_2(t)$  的频率分布为  $(f_2 + k\tau_2, f_2 + k(T + \tau_2))$ ; 那么  $x_1(t)$  的多普勒中心频率为  $f_1 + k\tau_1 + kT/2$ ,  $x_2(t)$  的多普勒中心频率为  $f_2 + k\tau_2 + kT/2$ ,  $kT$  为信号带宽,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别为两信号的起始时间。当满足  $\tau_1 \neq \tau_2$  时, 两信号的多普勒中心频率就会不同。这时, 传统的分数阶Fourier变换将无法分辨出这两个不同的运动目标。

针对上述问题本文提出一种改进分数阶Fourier变换的多运动目标检测方法, 其核心思想是对运动目标回波进行分数阶Fourier变换后, 通过二维峰值搜索得到多普勒参数估计值, 然后利用估计得到的参数构造窄带滤波器将单个峰值所对应的运动目标进行(可能对应多个运动目标且回波幅度可比拟)提取, 在时域对该峰值对应的目标回波信号进行二次检测和分离处理。具体实现步骤为:

1) 对SAR回波进行距离压缩、包络校正和三次相位补偿, 采用DPCA方法进行静止目标抑制。

2) 对运动目标信号在  $[0, 2\pi)$  范围做分数阶傅里叶变换并计算出分数阶Fourier变换的模平方, 检测出若干强信号的峰值, 对其中最强信号的分数阶Fourier变换能量谱进行二维搜索。具体可以采用最小波形熵搜索完成多普勒调频率和起始频率的估计得到  $(\hat{k}_i, \hat{f}_i)$ 。波形熵是用于衡量一个信号波形的能量沿其参数轴发散程度的概念, 当能量越集中时对应波形熵就越小。

3) 构造中心频率为  $\hat{f}_i$  的带通滤波器将峰值所对应的强信号提取出来得到  $S_i(t)$ , 该信号中可能包含调频率相同但多普勒中心频率不同的运动目标信号。

4) 利用估计得到的参数  $(\hat{k}_i, \hat{f}_i)$  构造参考信号, 得到  $S_{\text{ref}}(t) = \exp(j2\pi(\hat{f}_i t + \frac{1}{2}\hat{k}_i t^2))$ , 将步骤3)得到的目标回波信号与参考信号的复共轭进行相乘, 并进行Fourier变换得到  $\text{FFT}(S_i(t)S_{\text{ref}}^*(t))$ , “\*”表示取共轭。

5) 由步骤4)的Fourier变换结果得到若干个单频点  $f_{n|i}$ ,  $n$ 表示第*i*个分数阶Fourier变换峰值所对应的运动目标个数, 且  $f_{0|i} = 0$ 。  $f_{n|i}$ 即为第*n*个信号与第一个信号的多普勒中心频率差。如果  $\tau$ 为回波信号的时宽, 所估计得到的多普勒中心频率为:

$$\hat{f}_{\text{cn}|i} = \hat{f}_i + f_{n|i} + \hat{k}_i \tau / 2 \quad (11)$$

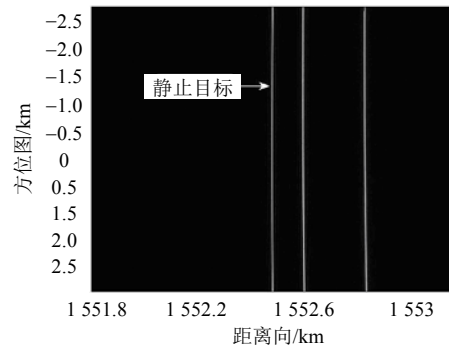
6) 从SAR运动回波中将强信号剔除, 然后重复步骤2)~步骤4)并与设定的检测门限比较, 依次完成所有运动目标信号的检测和参数估计。

为了能在步骤4)中进行多普勒中心频率估计时

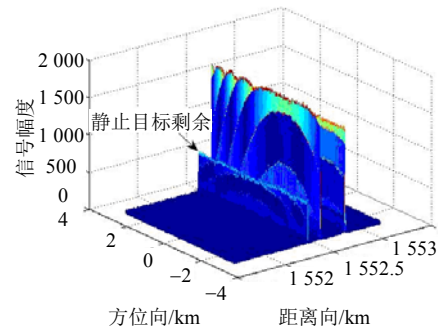
不发生频谱混叠现象, 要求两信号  $k(T + \tau_1) < k\tau_2$  即  $\tau_2 - \tau_1 > T$ , 多个信号的情况与此类似。在精确估计得到各个信号的多普勒参数后, 就可以分别进行运动目标的聚焦成像处理。

## 4 计算机仿真分析

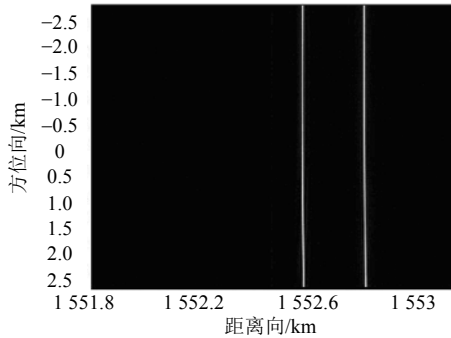
为验证本文方法对运动目标回波三次相位补偿和多普勒参数估计的效果, 利用星载双通道SAR系统进行仿真分析。卫星轨道高度1 500 km, 飞行速度  $v_a = 7\ 200$  m/s, 雷达工作波长6 cm, 脉冲宽度10  $\mu\text{s}$ , 脉冲重频1 200 Hz, SNR=5 dB。场景中存在一个静止目标坐标为(0, 400 km, 1 500 km), 同时存在两个运动目标, 坐标分别为(0, 400.5 km, 1 500 km)和(0, 401.5 km, 1 500 km), 且运动目标具有速度矢量  $\mathbf{v}_{x1} = 10$  m/s,  $\mathbf{v}_{y1} = 22$  m/s,  $a_{x1} = 5$  m/s<sup>2</sup>,  $a_{y1} = 10$  m/s<sup>2</sup>和  $\mathbf{v}_{x2} = 10$  m/s,  $\mathbf{v}_{y2} = 36$  m/s,  $a_{x2} = 8$  m/s<sup>2</sup>,  $a_{y2} = 5$  m/s<sup>2</sup>。图2a所示为通道1回波完成距离压缩后的结果, 静止目标和运动目标同时存在; 图2b所示为未补偿信号三次相位的DPCA静止目标抑制结果, 可以看到由于三次相位的存在使得在使用DPCA方法时会产生由于时间补偿带入的静止目标剩余, 进而影响后续运动目标检测和多普勒参数估计。图2c为采样本文方法完成三次相位补偿后的静止目标抑制结果, 与未补偿前相比信杂比提高16.02 dB, 从而更有利于运动目标检测和后续的参数估计。



a. 通道1信号距离压缩后结果

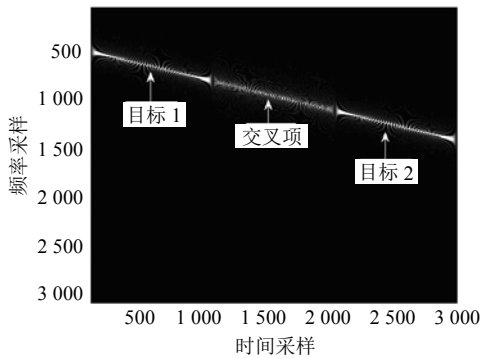


b. 三次相位补偿前对消结果的三维图

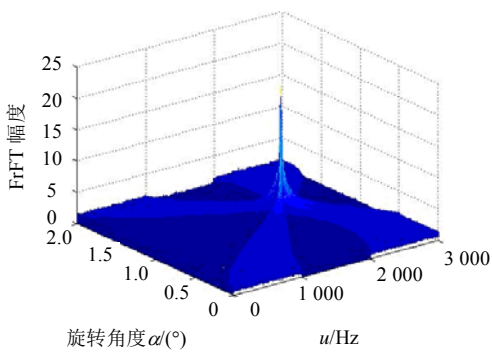


c. 三次相位补偿后对消结果

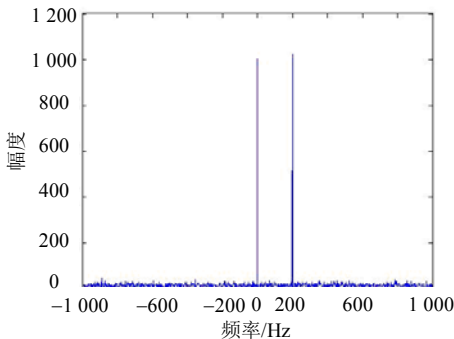
图2 三次相位补偿前后的静止目标对消结果比较



a. 两目标回波信号的WVD



b. 两目标回波信号的分数阶Fourier变换重合



c. 两目标的多普勒中心频率差

图3 利用改进分数阶Fourier变换进行多普勒参数估计

在完成三次相位补偿和静止目标抑制后, 由于运动目标的特性可能会出现多普勒调频率和初始频

率相同, 但多普勒中心频率不同的两个运动目标。这里假设其中调频率  $k = 150 \text{ Hz/s}$ , 起始频率  $f_{c1} = f_{c2} = 200 \text{ Hz}$ , 但目标由于运动特性不同造成各自回波的起始时间不同。图3a所示为两信号的WVD, 可以看到它们在时频分布平面上沿一条直线分布, 中间部分为交叉项; 为了完成多普勒参数的精确估计, 采用改进分数阶Fourier变换方法进行处理。图3b为两信号的分数阶Fourier变换谱图, 可以看到由于信号的特殊性, 此时在谱图上只能搜索到一个峰值点, 从中无法区分出两个信号, 从而造成目标丢失的问题。采用本文方法, 即使用最小波形熵方法完成谱图的二维搜索得到调频率估计值  $\hat{k} = 200.2 \text{ Hz/s}$ 和起始频率估计值  $\hat{f} = 150.12 \text{ Hz}$ , 利用估计得到的参数构造带通滤波器对运动回波进行提取, 对提取后信号与参考信号共轭相乘后进行FFT计算如图3c所示。从图中可以看出, FFT后得到两个单频率点, 分别为0、200 Hz。此时可以得到多普勒中心频率估计值分别为200.17 Hz和400.17 Hz。

### 5 结束语

运动目标的加速度使得回波产生方位向上的三次相位, 影响静止目标抑制、参数估计和聚焦成像。本文在分析三次相位对SAR运动目标检测影响的基础上, 提出在时间-调频率平面内采用类似Dechirp和一维搜索的方法实现回波的三次相位补偿; 完成相位补偿后, 为了克服某些运动目标由于调频率和初始频率相同但多普勒中心频率不同带来的目标丢失现象, 采用改进分数阶Fourier变换的方法进行多普勒参数估计并给出了相应的处理方法。最后, 计算机仿真验证了所述方法的有效性。

### 参 考 文 献

[1] 孙娜, 周荫清, 李景文. 基于DPCA技术的星载SAR/GMTI处理方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(10): 1564-1568.  
 SUN Na, ZHOU Yin-qing, LI Jing-wen. Algorithm of spaceborne SAR/GMTI based on DPCA[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2005, 27(10): 1564-1568.

[2] 陈娟, 王盛利. 基于二天线的双基地DPCA技术[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1687-1690.  
 CHEN Juan, WANG Sheng-li. Bistatic radar DPCA technique based on two-antenna[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(7): 1687-1690.

[3] ROMEISER R, THOMPSON D R. Numerical study on the alongtrack interferometric radar imaging mechanism of oceanic surface currents[J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing, 2000, 38(1): 446-458.

- [4] BARBER B C. Multichannel ATI-SAR with application to the adaptive Doppler filtering of ocean swell waves[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003, 150(6): 403-410.
- [5] SUN Hua-dong, SU Fu-lin, GAO Jian-jun, et al. Parameter estimations of SAR moving target based on DPCA-FrFT algorithm[D]//IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. [S.l.]: IEEE, 2007.
- [6] 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 Bin, QING Yu-liang, WANG Hong-qiang, 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.
- [7] 李亚超, 苏军海, 邢孟道, 等. 利用时间-调频率分布特性的复杂运动目标ISAR成像研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(1): 1-7.  
LI Ya-chao, SU Jun-hai, XING Meng-dao, et al. Research on ISAR imaging of the complexly moving target based on the time-chirp distribution[J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(1): 1-7.
- [8] 周峰, 李亚超, 邢孟道, 等. 一种单通道SAR地面运动目标成像和运动参数估计方法[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 543-548.  
ZHOU Feng, LI Ya-chao, XING Meng-dao, et al. An effective approach to ground moving target imaging and motion parameter estimation for single channel SAR System[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 543-548.
- [9] 赵学云, 刘峰. 基于Radon-WVD变换的编队目标架次识别[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 544-548.  
ZHAO Xue-yun, LIU Zheng. Target number detection based on Radon-WVD transform[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(3): 544-548.
- [10] SUN Hong-bo, LIU Guo-sui, GU Hong, et al. Application of the fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2002, 38(4): 1416-1424.
- [11] AMIN A S, SORAGHAN J J. A new chirp scaling algorithm based on the fractional Fourier transform[J]. IEEE Trans Signal Processing Lett, 2005, 12(10): 705-708.
- [12] TAO Ran, DENG Bing. Sampling and sampling rate conversion of band limited signals in the fractional Fourier transform domain[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2008, 56(1): 158-171.

编辑 张俊