

DOI: 10.7652/xjtuxb201906012

严重方位模糊下的合成孔径雷达微弱运动目标 聚焦与参数估计方法

万俊, 周宇, 张林让, 陈展野
(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对现有运动目标聚焦方法存在的对多普勒模糊敏感、信噪比要求高、不能较好地实现无模糊运动参数估计的问题,提出一种严重方位模糊下的合成孔径雷达微弱运动目标聚焦与参数估计方法。首先,构造方位谱压缩函数压缩目标方位谱带宽;其次,应用二阶 Keystone 变换补偿距离弯曲;随后,通过所构造的距离走动补偿函数与吕氏分布变换(LVD)完成剩余距离徙动和多普勒徙动的补偿,进而实现目标能量聚焦;最后,结合参数粗估计结果,设计一种 LVD 域的无模糊参数精估计准则。仿真结果表明:该方法不受方位多普勒谱分裂与 LVD 域多普勒模糊的影响,具有较强的抗噪性,与 Radon 分数阶傅里叶变换的方法和基于非线性变换的方法相比,信噪比损失分别降低了约 2 dB 和 15 dB。

关键词: 合成孔径雷达;微弱运动目标聚焦;无模糊参数估计;多普勒谱分裂;距离徙动;多普勒徙动

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)06-0085-07

A Method for Weak Moving Target Focusing and Parameter Estimation of Synthetic Aperture Radars in Severe Azimuth Ambiguity

WAN Jun, ZHOU Yu, ZHANG Linrang, CHEN Zhanye
(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A method for weak moving target focusing and parameter estimation of synthetic aperture radars is proposed to solve the problems that existing moving target focusing methods are sensitive to Doppler ambiguity, require high signal-to-noise ratio (SNR) and cannot estimate unambiguous parameter. Firstly, an azimuth spectrum compression function is constructed to compress the azimuth spectrum bandwidth of a target. Secondly, the second-order Keystone transform is applied to correct the range curvature. Then, the residual rang migration and Doppler migration are eliminated by a proposed range walk compensation function and the Lv's distribution (LVD), and the moving target energy focus is finally achieved. Meanwhile, a precise estimation criterion of unambiguous parameters in LVD domain is designed by combining rough parameter estimation results. Simulation results show that the proposed method works well in the presence of Doppler spectrum splitting and Doppler ambiguity in LVD domain and has good anti-noise performance. Comparisons with the Radon fractional Fourier transform method and the nonlinear transform-based method show that the proposed method reduces the loss of SNR by 2 dB and 15 dB, respectively.

Keywords: synthetic aperture radar; weak moving target focusing; unambiguous parameter estimation; Doppler spectrum split; rang migration; Doppler migration

合成孔径雷达(SAR)作为一种微波成像系统,其具有全天时、全天候的工作特点,广泛应用于军事和民用领域^[1-4]。随着 SAR 对运动目标信息获取需求的增长,地面运动目标检测已经成为 SAR 应用中的一项重要任务,对提升 SAR 系统的运动信息感知能力,如战场态势的评估与交通情况的监控等,具有重要意义^[5-8]。

随着 SAR 有效合成孔径时间的延长与分辨率的提升,雷达探测场景中运动目标的距离徙动和多普勒徙动更为严重,导致目标能量散焦,严重地影响运动目标的检测与参数估计,尤其是较低信噪比的微弱目标问题更加突出。近年来,由于 Keystone 变换(KT)可以在没有参数先验信息的情况下,对多个运动目标的距离徙动进行统一校正,因此基于 KT 的运动目标聚焦方法受到广泛关注^[9-11]。然而,当场景中存在径向快速运动目标的时候,会引起运动目标的多普勒模糊。此时,如果直接应用 KT 校正距离徙动会导致该方法失效,甚至目标轨迹的分裂^[12],严重影响后续运动目标的聚焦与参数估计。为此,文献[13]通过搜索模糊数来避免多普勒模糊。然而,该方法忽略了多普勒谱分裂的影响。文献[14]虽然考虑了多普勒谱分裂的影响,但其非线性变换的特点,导致了该方法在低信噪比情况下性能严重恶化,限制了其对微弱运动目标的应用。文献[15]提出了一种基于 Radon 分数阶傅里叶变换(FRFT)的微弱运动目标聚焦方法,在低信噪比环境下也能获得较好的性能,然而,此方法涉及到全维参数搜索,计算复杂度过高,且在较长的合成孔径时间下尤为突出。

近年来,吕氏分布变换(LVD)作为一种快速时频分析方法,表现出较好的抗噪声和交叉项抑制的性能^[16-17],被广泛应用于运动目标的参数估计之中。然而,LVD 有效的运动目标信号中心频率估计范围只有信号采样范围的一半,容易造成运动目标参数估计结果的进一步模糊。

针对现有方法存在的对多普勒模糊敏感、信噪比要求高、不能较好的提供无模糊运动参数估计的问题。本文提出了一种严重方位模糊下的 SAR 微弱运动目标聚焦与参数估计方法。首先,通过构造方位谱压缩函数消除了多普勒谱分裂的影响;其次,采用二阶 KT(SOKT)校正距离弯曲;随后,通过所

构造的距离走动补偿函数与 LVD 完成运动目标的聚焦;最后,结合参数粗估计结果,提出一种 LVD 域无模糊参数估计准则,消除了 LVD 域多普勒模糊对参数估计的影响。理论分析与仿真实验结果表明,本文方法不受方位多普勒谱分裂与 LVD 域多普勒模糊的影响,与 Radon 分数阶傅里叶变换的全维搜索方法相比具有抗噪性能强、计算复杂度低等优点。

1 信号模型

图 1 给出了正侧视工作模式下,地面运动目标与 SAR 平台在斜距平面上的几何关系模型。在合成孔径时间 T_a 内,平台以速度 v 沿飞行方向匀速直线飞行,任意点目标从 a 点运动到 b 点。其中, v_c 、 v_a 分别表示地面运动目标的径向速度和方位向速度, R_0 表示最近斜距, η 表示方位慢时间变量。

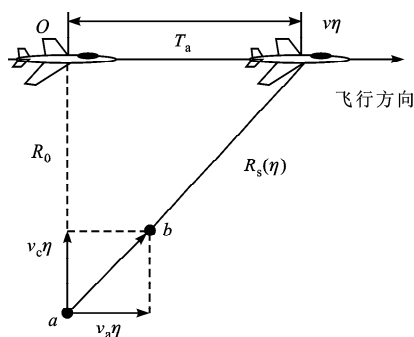


图1 SAR平台和地面运动目标的几何关系模型

结合图 1 中所示的几何关系,雷达和目标之间的瞬时距离 $R_s(\eta)$ 表示为

$$R_s(\eta) = \sqrt{(v\eta - v_a\eta)^2 + (R_0 - v_c\eta)^2} \quad (1)$$

式中: R_0 为最近斜距。

根据泰勒级数展开,忽略二阶以上的高阶项后,瞬时斜距(1)可以表示为^[13-14]

$$R_s(\eta) \approx R_0 - v_c\eta + [(v - v_a)^2 / (2R_0)]\eta^2 \quad (2)$$

假设雷达发射线性调频信号

$$s_t(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c t + j\pi \mu t^2) \quad (3)$$

式中: $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩形窗函数; T_p 、 μ 、 f_c 和 t 分别表示脉冲宽度、调频率、载频和距离快时间变量。

经过相干检波后,回波可以表示为^[18]

$$s_r(t, \eta) = \text{rect}\left[\frac{t - 2R_s(\eta)/c}{T_p}\right] w_a(\eta) \cdot$$

$$\exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}R_s(\eta) + j\pi\mu[t - 2R_s(\eta)/c]^2\right\} \quad (4)$$

式中: c 表示光速; λ 表示发射信号波长; $w_a(\eta)$ 表示方位窗函数。进行脉冲压缩处理后,回波在距离频域和方位慢时间域表示为

$$s_1(f, \eta) = A_1 \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right) w_a(\eta) \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}(f+f_c)\left[R_0 - v_c\eta + \frac{(v-v_a)^2}{2R_0}\eta^2\right]\right\} \quad (5)$$

式中: A_1 为脉压后信号幅度; B 为发射信号带宽; f 为距离频率变量。从式(5)中可以看出,距离频率和方位慢时间耦合, η 项引入距离走动和额外的多普勒中心偏移, η^2 项引入距离弯曲和多普勒徙动。为了对运动目标聚焦与参数估计,需要对距离走动、距离弯曲和多普勒徙动,进行有效的补偿。

2 运动目标聚焦与参数估计方法

2.1 方位多普勒谱带宽压缩

由于多普勒谱展宽将导致多普勒谱分裂,此时如果直接使用KT或者二阶KT(SOKT)消除距离徙动,将导致运动目标的轨迹分裂和错误的运动目标数目估计^[14],严重地影响距离徙动补偿的性能。为此,构造方位谱压缩函数为

$$H_{m1}(f, \eta) = \exp\left[j\frac{4\pi}{c}(f+f_c)\frac{v^2}{2R_0}\eta^2\right] \quad (6)$$

假设 M_{amb} 表示目标的多普勒模糊数,则有

$$v_c = v_0 + \frac{M_{\text{amb}}\lambda f_{\text{PRF}}}{2} \quad (7)$$

式中: v_0 为目标的径向基带速度; f_{PRF} 表示脉冲重复频率。将式(7)代入式(5),经过方位多普勒谱带宽压缩后的信号可以表示为

$$s_2(f, \eta) = s_1(f, \eta) H_{m1}(f, \eta) =$$

$$A_1 \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right) w_a(\eta) \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}(f+f_c) \cdot \left[R_0 - \left(v_0 + \frac{M_{\text{amb}}\lambda f_{\text{PRF}}}{2}\right)\eta + \Delta a_1 \eta^2\right]\right\} \quad (8)$$

式中: $\Delta a_1 = (v_a^2 - 2v v_a)/(2R_0)$ 。

此外,由于 $\exp\left(j\frac{4\pi f_c M_{\text{amb}}\lambda f_{\text{PRF}}}{2}\eta\right) = 1$,式(8)

可以化简为

$$s_2(f, \eta) = A_1 \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right) w_a(\eta) \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}(f+f_c)R_0\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}(f+f_c)(-v_0\eta + \Delta a_1 \eta^2)\right]$$

$$\exp\left[j\frac{4\pi}{c}f\left(\frac{M_{\text{amb}}\lambda f_{\text{PRF}}}{2}\right)\eta\right] \quad (9)$$

从式(9)中可以看出,经过预处理后,极大地压缩了目标的方位多普勒谱带宽,使目标方位谱扩散与分裂问题得到了有效的解决,但目标多普勒中心偏移依然存在,此时在极端的情况下依然有可能产生多普勒谱分裂的现象。由于压缩后的多普勒谱带宽通常会小于 $f_{\text{PRF}}/2$,此时可以使用文献[19]中对多普勒中心平移 $f_{\text{PRF}}/2$ 的方法,进一步消除谱分裂对距离徙动校正的影响,这里不再赘述。

2.2 距离弯曲补偿

由上述分析可知,经过方位谱带宽压缩处理后,方位多普勒谱分裂现象得到了较好的解决。此时,利用SOKT补偿式(9)的距离弯曲,则可以避免运动目标轨迹分裂的影响。因此,对式(9)应用SOKT,即 $(f+f_c)\eta^2 = f_c\xi^2$,可以得到

$$s_2(f, \xi) = A_1 \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right) w_a(\xi) \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}(f+f_c)R_0\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi}{c}(f+f_c)v_0\sqrt{\frac{f_c}{f+f_c}}\xi\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}f_c\Delta a_1\xi^2\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi}{c}f\left(\frac{M_{\text{amb}}\lambda f_{\text{PRF}}}{2}\right)\sqrt{\frac{f_c}{f+f_c}}\xi\right] \quad (10)$$

由泰勒级数展开,得 $\sqrt{f_c/f+f_c} \approx -f/2f_c$,则式(10)可以化简为

$$s_2(f, \xi) = A_1 \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right) w_a(\xi) \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}(f+f_c)R_0\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi}{c}f\left(\frac{M_{\text{amb}}\lambda f_{\text{PRF}}}{2}\right)\xi\right] \exp\left[j\frac{\pi}{c}f^2\frac{M_{\text{amb}}\lambda f_{\text{PRF}}}{f_c}\xi\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi}{\lambda}(v_0\xi - \Delta a_1\xi^2)\right] \exp\left[j\frac{4\pi}{c}f\frac{v_0}{2}\xi\right] \quad (11)$$

从式(11)可以看出:通过SOKT处理后,目标的距离弯曲得到有效的补偿;同时,也可以发现应用SOKT处理后,目标的距离走动量变为原来的1/2,因此有利于随后的距离走动补偿。

2.3 剩余距离走动与多普勒徙动补偿

由式(11)可知,虽然SOKT消除了距离弯曲,但距离走动和多普勒徙动依然存在。为此,本节根据上节推导的式(11)构造剩余距离走动补偿函数进行距离走动补偿。为了方便分析,本文首先假设已知目标的径向速度,则补偿函数可以表示为

$$H_{m2}(f, \xi; v_c) = \exp\left\{-j\frac{\pi}{c}\frac{f^2}{f_c}M_{\text{amb}}\lambda f_{\text{PRF}}\xi\right\}$$

$$\exp\left\{-j\frac{4\pi f}{c}\left[v_c - \frac{M_{\text{amb}}\lambda f_{\text{PRF}}}{2}\right]\xi/2\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi f}{c}\left[\frac{M_{\text{amb}}\lambda f_{\text{PRF}}}{2}\right]\xi\right\} \quad (12)$$

将式(11)与(12)相乘得到

$$s_3(f, \xi) = s_2(f, \xi) H_{m2}(f, \xi; v_c) = A_1 \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right) w_a(\xi) \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}(f + f_c)R_0\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi}{\lambda}(v_0\xi - \Delta a_1\xi^2)\right] \quad (13)$$

将式(13)沿距离维逆傅里叶变换(IFT)得到距离快时间和方位慢时间域的信号表示为

$$s_3(t, \xi) = A_2 \text{sinc}\left[B\left(t - \frac{2R_0}{c}\right)\right] \exp\left[j\frac{4\pi}{\lambda}(v_0\xi - \Delta a_1\xi^2)\right] \quad (14)$$

式中: A_2 表示目标信号幅度。沿方位慢时间域的目标回波信号表达式如下

$$s_4\left(\frac{2R_0}{c}, \xi\right) = A_2 \exp\left[j\frac{4\pi}{\lambda}(v_0\xi - \Delta a_1\xi^2)\right] \quad (15)$$

由式(14)可知,当运动目标的距离徙动得到完全补偿之后,目标的回波信号仅落在一个距离单元内。如式(15)所示,目标回波信号沿方位慢时间是一个中心频率和调频率分别为 $2v_0/\lambda$ 和 $-4\Delta a_1/\lambda$ 的线性调频信号。

LVD 为一种快速时频分析方法。由于其渐进线性与二维时频相参累积的特点,使其可以同时多分量的线性调频信号进行累积与参数估计,表现出较好的抗噪声和交叉项抑制的性能^[16]。因此,使用 LVD 对式(15)剩余的方位多普勒徙动进行补偿与能量聚焦。式(15)定义的 LVD 可以表示为^[16]

$$\text{lvd}\left[s_4\left(\frac{2R_0}{c}, \xi\right)\right] = \iint s_4\left(\xi + \frac{\tau_m + \psi}{2}\right) s_4^*\left(\xi - \frac{\tau_m + \psi}{2}\right) \cdot \exp(-j2\pi f_{\tau_m} \tau_m) \exp[-j2\pi \beta f_{\xi}(\tau_m + \psi)\xi] d\tau_m d\xi = A_3 \exp(j2\pi \psi f_{\tau_m}) \text{sinc}\left(f_{\tau_m} - \frac{2v_0}{\lambda}\right) \text{sinc}\left(f_{\xi} + \frac{4\Delta a_1}{\beta\lambda}\right) \quad (16)$$

式中: $\text{lvd}(\cdot)$ 表示沿 ξ 轴方向进行 LVD 变换; τ_m 为时延变量; ψ 为一个常数时延; β 为一个常数; A_3 表示 LVD 输出的信号幅度。通常情况下取 $\psi = \beta = 1$ ^[16], 则式(16)可以化简为

$$\text{lvd}\left[s_4\left(\frac{2R_0}{c}, \xi\right)\right] = (f_{\xi}, f_{\tau_m}) = A_3 \exp(j2\pi f_{\tau_m}) \text{sinc}\left(f_{\tau_m} - \frac{2v_0}{\lambda}\right) \text{sinc}\left(f_{\xi} + \frac{4\Delta a_1}{\beta\lambda}\right) \quad (17)$$

由式(17)可知运动目标的能量在 LVD 的中心频率-调频率域得到较好的聚焦,在 $f_{\tau_m} = 2v_0/\lambda$ 和 $f_{\xi} = -4\Delta a_1/\lambda$ 处形成峰值。因此,可以得到 v_0 和 Δa_1 的 LVD 域估计值 $\hat{v}_0$ 和 $\Delta \hat{a}_1$ 为

$$\hat{v}_0 = \lambda \hat{f}_{\tau_m} / 2; \Delta \hat{a}_1 = -\lambda \hat{f}_{\xi} / 4 \quad (18)$$

上述推导过程是假设在径向速度已知的情况下进行的,然而通常这些参数是未知的。因此,需要先估计径向速度,则搜索估计表达式如下

$$(\hat{t}, \bar{v}_c) = \arg \max_{\bar{v}_c, \hat{t}} |\text{lvd}[s_5(t, \xi; v_c)]| \quad (19)$$

式中: $s_5(t, \xi; v_c) = \text{ift}[s_2(f, \xi) H_{m2}(f, \xi; v_c)]$, $\text{ift}(\cdot)$ 表示沿 f 轴方向进行 IFT 变换; $\hat{t}$ 为目标所在距离单元估计结果; $\bar{v}_c$ 为径向速度估计结果。由于式(19)中 v_c 的搜索步长为 $c/(T_d B)$, 因此 $\bar{v}_c$ 仅是一个粗估计的结果,如何得到精估计值由下节给出。

方位聚焦结果和峰值位置可以通过下式得到

$$(\hat{f}_{\tau_m}, \hat{f}_{\xi}) = \arg \max_{f_{\tau_m}, f_{\xi}} |\text{lvd}[s_5(\hat{t}, \xi; \bar{v}_c)]| \quad (20)$$

2.4 无模糊径向速度与方位向速度估计

由于 LVD 对中心频率的估计范围为 $[-f_{\text{PRF}}/4, f_{\text{PRF}}/4]$, 而目标基带速度的中心频率范围为 $[-f_{\text{PRF}}/2, f_{\text{PRF}}/2]$, 因而有一半的基带速度是在 LVD 中心频率估计范围之外。此时, LVD 估计出的速度可能是一个模糊速度,如果不对其在 LVD 域进行解模糊,将导致中心频率的错误估计。因此,本节提出了结合径向速度粗估计值与 LVD 域模糊速度估计值,进行无模糊径向速度精估计的方法。

由上述分析可知 LVD 域可能存在的模糊数为 -1 和 1 , 而 LVD 域的最大不模糊速度范围为 $\lambda f_{\text{PRF}}/4$, 所以此时与 $\hat{v}_0$ 对应的 LVD 域不模糊径向速度仅可能为以下 3 种情况

$$\left. \begin{aligned} \hat{v}_{c1} &= \hat{v}_0 + \hat{M}_{\text{amb}} \lambda f_{\text{PRF}} / 2 - \lambda f_{\text{PRF}} / 4 \\ \hat{v}_{c2} &= \hat{v}_0 + \hat{M}_{\text{amb}} \lambda f_{\text{PRF}} / 2 \\ \hat{v}_{c3} &= \hat{v}_0 + \hat{M}_{\text{amb}} \lambda f_{\text{PRF}} / 2 + \lambda f_{\text{PRF}} / 4 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中: $\hat{M}_{\text{amb}} = \text{round}[2\bar{v}_c / (\lambda f_{\text{PRF}})]$, $\text{round}(\cdot)$ 表示取整操作。比较 $\Delta \hat{v}_{c1} = |\hat{v}_{c1} - \bar{v}_c|$ 、 $\Delta \hat{v}_{c2} = |\hat{v}_{c2} - \bar{v}_c|$ 和 $\Delta \hat{v}_{c3} = |\hat{v}_{c3} - \bar{v}_c|$ 的值,其中最小值所对应的速度估计值即为无模糊径向速度精估计值,其具体表达式如下

$$\hat{v}_c = \arg \min_{\hat{v}_{ci}, i=1,2,3} (|\hat{v}_{ci} - \bar{v}_c|) \quad (22)$$

由 2.1 节得 $(v - v_a)^2 / (2R_0) = \Delta a_1 + v^2 / (2R_0)$, 因此方位向速度的估计值 $\hat{v}_a$ 为

$$\hat{v}_a = v - \sqrt{(\Delta \hat{a}_1 2R_0 + v^2)} \quad (23)$$

本文所提方法的流程图如图 2 所示。

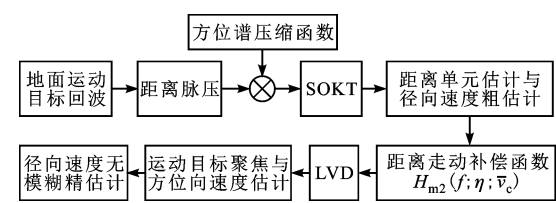


图 2 本文方法处理流程图

3 算法复杂度分析

设 N 、 M 分别为距离单元个数和方位脉冲个数。本文所提方法主要计算量包含:一次 SOKT 处理,如果 SOKT 用精确的插值实现其计算量为 $O[NM^2 + M(M-1)N]$; L 次距离走动搜索补偿,即主要包含 L 次 N 个距离单元的 LVD 处理,而一次 N 个距离单元的 LVD 处理的计算量为 $O(NM^2 \lg M)^{[16]}$,因此距离走动补偿的计算量为 $O(LNM^2 \lg M)$;最后还需进行一次 LVD 多普勒徙动补偿。综上,本文算法的计算复杂度量级为 $O[(L+1)NM^2 \lg M]$ 。文献[15]全维搜索算法的计算复杂度量级为 $O(N_v N_a NM^2 \lg M)^{[15]}$,其中 N_v 和 N_a 分别表示该方法的一阶和二阶系数搜索次数。同时其搜索步长分别为 $\lambda/(2T_a)$ 和 $\lambda/(T_a^2)^{[15]}$,而本文方法的搜索步长为 $c/(T_a B)$ 。由于本文方法的搜索步长远大于文献[15]方法,且搜索维度降低一维,因此本文方法计算复杂度远小于同为搜索类方法的文献[15]方法。

4 仿真实验与分析

为了验证算法的有效性,本节设计了 3 个仿真实验,仿真使用的雷达参数如表 1 所示。同时,仿真假设回波信号杂波已经得到了有效的抑制^[5,20]。

表 1 雷达仿真参数

参数	数值
载频/GHz	10
距离带宽/MHz	200
脉冲宽度/ μ s	1
脉冲重复频率/Hz	960
雷达平台速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	140
中心斜距/m	5 000

4.1 仿真实验 1

本实验主要为了验证所提算法的有效性。实验中目标 A 参数设置为 $v_c = 20.0 \text{ m/s}$, $v_a = -24.6 \text{ m/s}$;目标 B 参数设置为 $v_c = -12.7 \text{ m/s}$, $v_a = 14.5$

m/s ;目标的信噪比设置为脉压后 -12 dB 。仿真结果如图 3~图 5 所示。为了清晰地显示与对比算法处理前后的目标轨迹和谱分布的结果,图 3b 和 3d,图 4a、4b 和 4c 给出的是相应的无噪声的结果。结合图 3a 和 3b 可知,由于微弱目标的回波信噪比低,目标运动引起的距离徙动明显,能量散焦严重,脉压后的目标轨迹已经淹没在噪声中。结合图 3c 和 3d 可以发现,由于目标的多普勒徙动明显,目标信号直接进行方位傅里叶变换累积时,在频域中目标同样被噪声淹没,且由于目标 A 的径向速度较大,其方位多普勒谱产生了明显的分裂现象,而目标 B 由于径向速度较小,则频谱比较完整。图 4a 给出的是直接对原始目标信号应用 SOKT 的结果,从图中圆圈处看出由于目标 A 的方位多普勒谱分裂,经过 SOKT 处理后,目标的轨迹分裂成 2 个部分,严重影响了后续的聚焦与参数估计,并产生错误的目标数目估计,而目标 B 的多普勒谱在一个 PRF 频带内,其轨迹完好。图 4b 可以看出,经过方位谱压缩预处理后目标 A 和目标 B 的方位多普勒谱带宽得到了极大的压缩,谱扩展问题得到较好的解决,即避免了多普勒谱分裂的影响,同时也可以发现经过预处理后,目标的方位谱带宽已经小于 $f_{\text{PRF}}/2$ 了。图 4c 给出经过谱压缩后应用 SOKT 的结果,可以看出目标轨迹的距离弯曲在得到较好补偿的同时,目标的距离走动还存在,且经过压缩处理后,目标的轨迹没有发生分裂的现象,说明本文方法可以较好地解决多普勒谱分裂对距离徙动补偿的影响。图 4d 给出的是速度粗估计的结果,可以得出目标 A 和目标 B 的速度粗估计值分别为 19.76 m/s 和 -12.91 m/s 。

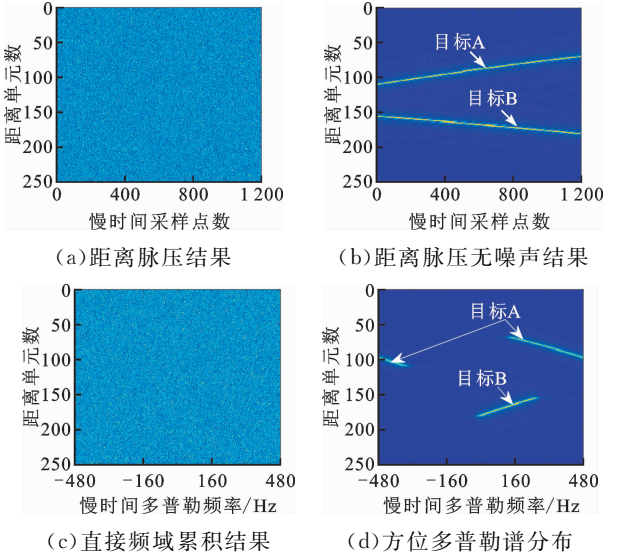


图 3 距离脉压与慢时间傅里叶变换处理结果

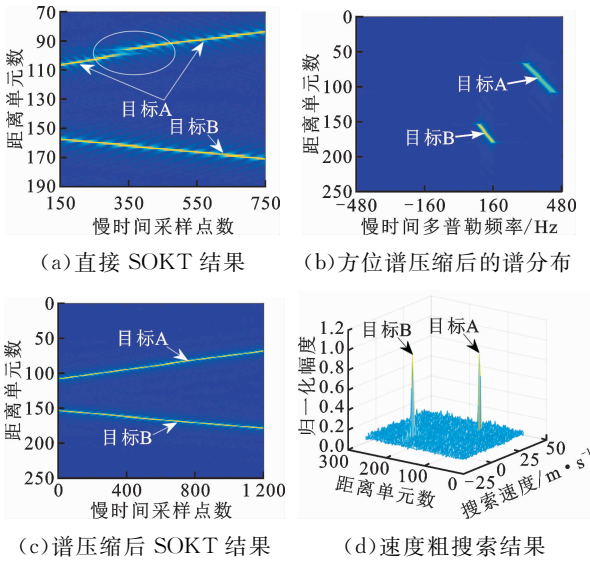


图 4 直接 SOKT 处理与所提方法处理结果

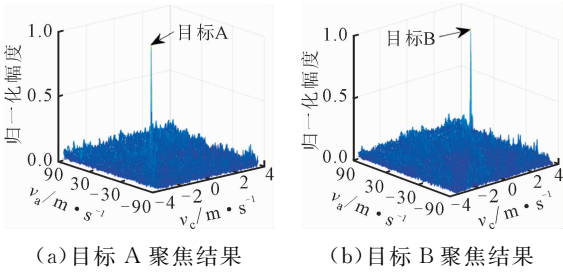


图 5 所提方法两目标最终聚焦结果

使用粗估计值进行剩余距离走动补偿后,应用 LVD 对目标 A 和目标 B 进行聚焦的结果如图 5 所示,可以看出,由于距离徙动与多普勒徙动得到较好的补偿,且 LVD 的抗噪性能强,目标 A 和目标 B 的能量得到了较好的聚集,在 LVD 域形成了明显的峰值。

由速度粗估计值得出目标 A 和目标 B 的多普勒模糊数估计值分别为 1 和 -1。从图 5a 得出目标 A 的基带速度估计值为 -1.614 7 m/s,而实际值为 5.6 m/s,显然此时估计出的径向基带速度在 LVD 域是一个模糊值,这与 2.4 节理论分析一致。因此,使用本文所提方法进行解模糊后,得到径向速度 v_c LVD 域无模糊估计值可能为 12.785 3、5.585 3 m/s 与 19.985 3 m/s。由此发现 19.985 3 m/s 与粗估计值差距最小,因此得出 19.985 3 m/s 为最终确定的无模糊径向速度精估计值,且与 19.76 m/s 的粗估计值比较,无模糊精估计大幅提高了参数估计的精度。以上说明了本文所提的无模糊精估计方法的有效性。同理,表 2 列出了本文方法得出的目标 A 和目标 B 的参数估计结果。表 2 结果证明了本文方法具有较好的参数估计性能,同时也说明了本文方法对多目标同样有效。综上所述,首先通过对比

谱压缩前后应用 SOKT 的结果,说明了本文方法解决多普勒谱分裂的有效性;其次,由于目标 A 和目标 B 的能量最终在 LVD 域得到较好的累积,说明了本文方法在运动目标聚焦方面的有效性;然后,通过比较 LVD 域解模糊前后的参数估计结果,说明了本文无模糊参数估计方法的有效性;最后,通过目标 A 和 B 参数估计的结果,说明了本文方法参数估计的有效性。

表 2 本文方法对 2 个目标参数的估计结果

目标	$v_c /$ $m \cdot s^{-1}$	v_c 估计误差/ $m \cdot s^{-1}$	$v_a /$ $m \cdot s^{-1}$	v_a 估计误差/ $m \cdot s^{-1}$
A	19.985 3	0.014 7	-24.742 5	0.142 5
B	-12.705 9	-0.005 9	14.670 2	-0.170 2

4.2 仿真实验 2

本实验主要为了验证所提算法的优势性。通过与文献[13-15]方法对比聚焦性能,与文献[14]方法对比参数估计性能来体现本文方法性能的优势。仿真参数同实验 1,设置的目标参数为目标 A,仿真结果如图 6 所示。图 6a 表示本文方法的聚焦结果,由于本文方法准确的补偿了距离徙动,且该过程是一个线性过程,而多普勒徙动补偿使用的 LVD 是一个渐进线性变换^[16],所以本文方法可以认为是一个渐进线性的方法。其目标的信噪比损失较小,能量累积效果好。图 6b 为文献[13]方法的聚焦结果,可以看出由于文献[13]方法距离弯曲的近似补偿,未考虑多普勒谱分裂等因素,目标信号能量损失较大,其能量不能得到较好的累积,因此目标信号基本还是淹没在噪声中。图 6c 为文献[14]方法的聚焦结果,

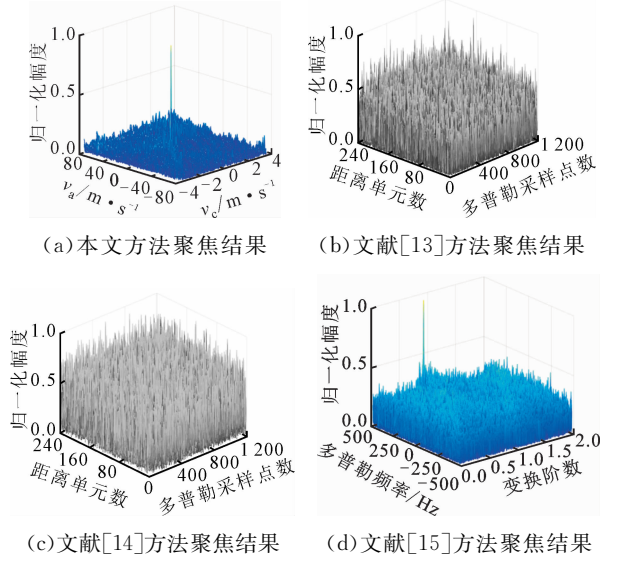


图 6 4 种不同方法的聚焦结果

可以看出由于文献[14]方法的非线性变换特性,导致了目标信号能量损失严重,目标的能量在距离多普勒域中不能较好的累积,其能量依然基本淹没在噪声中。图 6d 为文献[15]方法的聚焦结果,可以看出由于 LVD 的抗噪性比 FRFT 强^[16],所以本文方法的聚焦性能还是优于文献[15]方法,且由第 3 节分析可以得到本文方法的计算复杂度也远小于文献[15]方法。表 3 给出了本文方法与文献[14]方法参数估计性能的对比结果。由表 3 可以发现,在低信噪比条件下,本文方法的参数估计性能优于文献[14]方法。因此,通过比较本文方法和现有方法的聚焦与参数估计结果,说明了本文方法的优越性。

表 3 参数估计结果对比				
算法	$v_c /$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	v_c 估计误差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_a /$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	v_a 估计误差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
本文	19.985 3	0.014 7	-24.742 5	0.142 5
文献 [14]	65.017 0	-45.017 0	15.994 2	-40.594 2

4.3 仿真实验 3

本实验主要为了进一步验证本文方法的检测性能,仿真雷达参数同表 1,目标参数设置为目标 A。虚警概率设置为 10^{-6} ,信噪比设置为 -30 dB 到 15 dB ,间隔为 1 dB ,每个信噪比进行 200 次蒙特卡洛仿真实验。图 7 给出了 4 种不同算法的检测概率与输入信噪比的关系。由图 7 可以看出,本文方法与文献[15]方法的检测性能远优于文献[13]和文献[14]方法。其次,由于 LVD 的抗噪性能强于 FR-FT^[16],因此所提方法的聚焦性能和抗噪性能也是要优于文献[15]方法。通过检测性能的比较,进一步说明了本文方法抗噪性能与聚焦性能的先进性。

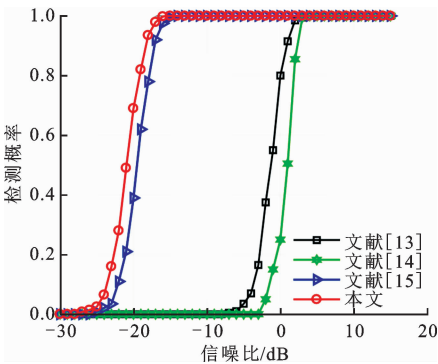


图 7 4 种不同方法的检测曲线对比

5 结束语

本文提出了一种严重方位模糊下的 SAR 微弱

运动目标聚焦与参数估计方法,该方法通过构造方位谱压缩函数与距离走动补偿函数消除了多普勒模糊对运动目标聚焦的影响,设计了 LVD 域无模糊参数估计准则,实现了运动参数的无模糊估计。本文的主要创新点在于:① 本文所提方法在严重方位模糊的情况下(包括多普勒中心模糊、多普勒谱分裂与 LVD 域多普勒模糊),也具有较好的性能;② 本文所提方法具有较强的抗噪性能与较低的计算量,能够实现对微弱运动目标的聚焦与无模糊参数估计。最后,仿真实验证明了本文方法的有效性。

参考文献:

[1] MOREIRA A, IRAOLA P P, YOUNIS M G, et al. A tutorial on synthetic aperture radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6-43.

[2] CHEN Z Y, ZHOU Y, ZHANG L R, et al. General range model for multi-channel SAR/GMTI with curvilinear flight trajectory [J]. Electronics Letters, 2019, 55(2): 111-112.

[3] 陈士超, 武其松, 吴玉峰, 等. 一种大斜视双基地合成孔雷达的频率变标成像算法 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(10): 82-87.

CHEN Shichao, WU Qisong, WU Yufeng, et al. A frequency scaling algorithm for high squint bistatic synthetic aperture radar [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(10): 82-87.

[4] TANG S Y, LIN C H, ZHOU Y, et al. Processing of long integration time spaceborne SAR data with curved orbit [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(2): 888-903.

[5] 李刚, 许稼, 彭应宁, 等. 基于混合积累的 SAR 微弱运动目标检测 [J]. 电子学报, 2007, 35(3): 576-579.

LI Gang, XU Jia, PENG Yingning, et al. SAR weak moving target detection based on hybrid integration [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 576-579.

[6] XU H J, YANG Z W, TIAN M, et al. An extended moving target detection approach for high-resolution multichannel SAR-GMTI systems based on enhanced shadow-aided decision [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(2): 715-729.

[7] OVEIS A H, SEBT M A. Coherent method for ground-moving target indication and velocity estimation using Hough transform [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2017, 11(4): 646-655.

(下转第 108 页)

- [8] 万俊, 周宇, 张林让, 等. 基于时间反转和降阶 Keystone 的 SAR-GMTI 快速聚焦方法 [J]. 航空学报, 2018, 39(6): 321862.
- WAN Jun, ZHOU Yu, ZHANG Linrang, et al. A fast SAR-GMTI focusing method based on time reversal and reduced-order Keystone [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(6): 321862.
- [9] BAI Y C, DAI Z N, ZHANG X G, et al. High accuracy velocity measurement based on Keystone transform using entropy minimization [J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 25(4): 774-778.
- [10] ZHOU F, WU R, XING M D, et al. Approach for single channel SAR ground moving target imaging and motion parameter estimation [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2007, 1(1): 59-66.
- [11] KIRKLAND D. Imaging moving targets using the second-order Keystone transform [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2011, 5(8): 902-910.
- [12] PERRY R P, DIPIETRO R C, FANTE R. SAR imaging of moving targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1): 188-200.
- [13] HUANG P H, LIAO G S, YANG Z W, et al. An approach for refocusing of ground moving target without target motion parameter estimation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(1): 336-350.
- [14] XIN Z H, LIAO G S, YANG Z W, et al. A fast ground moving target focusing method based on first-order discrete polynomial-phase transform [J]. Digital Signal Processing, 2017, 60: 287-295.
- [15] CHEN X L, GUAN J, LIU N B, et al. Maneuvering target detection via Radon-fractional Fourier transform based long-time coherent integration [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(4): 939-953.
- [16] LÜ X L, BI G A, WAN C R, et al. Lv's distribution: principle, implementation, properties, and performance [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(8): 3576-3591.
- [17] LUO S, BI G A, LÜ X L, et al. Performance analysis on Lv's distribution and its applications [J]. Digital Signal Processing, 2013, 23: 797-807.
- [18] BARBAROSSA S, LORENZO P D, VECCHIARELLI P. Parameter estimation of 2D multi-component polynomial phase signals: an application to SAR imaging of moving targets [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(17): 4375-4389.
- [19] ZHU S Q, LIAO G S, QU Y, et al. Ground moving targets imaging algorithm for synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 462-477.
- [20] 陈展野, 周宇, 张林让, 等. 非均匀环境下利用单个数据集的 STAP 算法 [J]. 航空学报, 2015, 36(12): 3938-3946.
- CHEN Zhanye, ZHOU Yu, ZHANG Linrang, et al. Single data set-STAP algorithm in heterogeneous environment [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(12): 3938-3946.

(编辑 刘杨)