

基于二阶 Keystone 变换的 FMCW SAR 动目标成像与参数估计

贺 靖, 谭鸽伟

(华侨大学 信息科学与工程学院, 厦门 361000)

摘要: 本文研究了一种适用于调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的地面动目标成像与参数估计的方法。首先, 建立 FMCW SAR 系统下的动目标回波模型, 通过多普勒频移补偿和时频代换, 提出了一种基于二阶 Keystone 变换校正动目标回波距离弯曲的方法。其次, 用 Hough 变换去估计动目标距离向速度, 并据此进行距离走动校正。最后, 采用 Wigner-Hough 变换估计动目标的多普勒调频率, 通过补偿二次和三次多普勒相位实现动目标的精确聚焦。仿真结果表明: 该方法对参数估计有较高的准确性, 同时估计的参数对动目标成像有较好的聚焦效果。

关键词: 调频连续波合成孔径雷达; 动目标参数估计与成像; 时频代换; 二阶 Keystone 变换; Wigner-Hough 变换

中图分类号: TN957.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)06-0080-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230804001

引用格式: 贺靖, 谭鸽伟. 基于二阶 Keystone 变换的 FMCW SAR 动目标成像与参数估计[J]. 遥测遥控, 2023, 44(6): 80–89.

Moving target imaging and parameter estimation based on second-order Keystone transform for FMCW SAR

HE Jing, TAN Gewei

(School of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361000, China)

Abstract: In this paper, a method for ground moving target imaging and parameter estimation suitable for frequency modulated continuous wave (FMCW) synthetic aperture radar (SAR) is studied. Firstly, the echo model of moving target under the FMCW SAR system is established. By Doppler shift compensation and time-frequency substitution, a method based on the second-order Keystone transform is proposed to correct the range cell curve of moving target. Secondly, the Hough transform is used to estimate the range velocity of moving target, and the range walk correction is carried out accordingly. Finally, the Wigner-Hough transform is utilized to estimate the Doppler frequency rate of moving target, and compensated the quadratic and cubic Doppler phases, thus achieved accurate focusing of the moving target. The simulation results show that the proposed method has high accuracy in parameter estimation, and the estimated parameters have a good focusing effect on moving target imaging.

Keywords: Frequency modulated continuous wave (FMCW) synthetic aperture radar (SAR); Moving target parameter estimation and imaging; Time-frequency substitution; Second-order Keystone transform; Wigner-Hough transform

Citation: HE Jing, TAN Gewei. Moving target imaging and parameter estimation based on second-order Keystone transform for FMCW SAR [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(6): 80–89.

引 言

相比于脉冲体制合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR), 调频连续波(Frequency Modu-

lated Continuous Wave, FMCW)体制 SAR 发射的是占空比为 100% 的大时宽信号, 这就导致了 FMCW SAR 的峰值发射功率非常小, 即使采用低功率传输也可以获得较高的信噪比值, 从而使系统更加

基金项目: 华侨大学高层次人才科研项目(10BS312)

通信作者: 谭鸽伟(tangewei70@163.com)

收稿日期: 2023-08-04 修回日期: 2023-09-17

紧凑和经济有效,同时具有分辨率高和隐蔽性好等优点,特别适合用于精密制导武器、无人机等小规模平台,是合成孔径雷达轻量化和小型化发展的一个重要趋势^[1]。

动目标检测与成像属于 FMCW SAR 的一项重要技术。由于 FMCW SAR 较长的扫频周期,传统 SAR 的“停走停”假设不再适用^[2-4],并且随着成像技术向着高分辨率方向发展,动目标的参数估计要求更为精准。对于较长相干积累时间的高分辨率成像,更为严重的距离徙动现象不可避免,而对于静止目标而言,其各参数均为已知,距离徙动校正函数也很容易的建立。但是,针对速度信息均为未知的动目标,不能直接建立相应的距离徙动校正函数^[5-9],对于有着不同速度信息的动目标,其距离徙动量也不相同,这些问题使得动目标回波信号的距离徙动校正变得非常困难。

文献[10]、文献[11]首先在动目标速度信息未知的情况下,只对载机速度引起的距离弯曲进行补偿。当动目标方位向速度相对载机速度较大时,距离弯曲只对载机速度进行校正并不能完全将包络曲线校正成直线,导致采用直线检测方法测得的倾斜角度不准确,从而产生较大的速度估计误差,使动目标的成像质量下降。在文献[12]中,采用一阶 Keystone 变换进行距离走动校正,然而在实际情况中,由于雷达发射的脉冲重复频率(PRF)有限,导致在观测动目标时通常会出现多普勒模糊,可能无法彻底校正距离走动。文献[13]、文献[14]在波数域中利用了相对运动的概念,首先补偿已知参数的相位,再通过搜索参数进行动目标再聚焦,其中参数搜索需要选择合适的搜索步长,此外波数域内进行的 Stolt 插值会破坏距离徙动项和方位误差相位之间的线性关系^[15]。文献[16]对动目标的二阶多普勒相位进行处理,忽略了更高阶项给成像结果带来的影响,然而针对高速动目标,三阶多普勒相位影响较大,不能忽略。文献[17-21]通过采用广义 Keystone 变换对距离弯曲项进行校正,但都是基于传统 SAR 的“停走停”假设进行的,因此对于 FMCW SAR 下的动目标成像并不适用。

针对上述存在的问题,本文在“非停走停”模式下提出了一种基于二阶 Keystone 变换校正动目标距离弯曲的方法。该方法不需要事先知道速度信息就能完成距离弯曲校正,对校正过后还存在距离走动的信号进行 Hough 变换,通过检测直

线斜率估计出动目标距离向速度,同时完成距离走动校正和三次距离徙动补偿。此时回波包络在方位向上呈直线分布,相当于消除了距离和方位之间的耦合。由于发射信号和接收信号都是线性调频信号,用时频分析的方法对剩下的方位向信号进行 Wigner-Vill^[22]分布,然后再用 Hough 变换估计出多普勒调频率即可求得方位向速度,并构造方位匹配滤波函数,通过相位补偿最终完成聚焦成像。该算法对回波信号采用三阶相位模型,经过三阶相位补偿后,可以实现动目标的方位对称聚焦。

需要说明的是,本文对动目标的成像与参数估计方法是基于动目标检测后进行的,动目标检测可以采用双通道的相位中心偏置天线(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)方法^[23]。在两个通道中,由于静止目标的相位历程一致,在时频域将两幅图像进行对消后只剩下动目标,最后可在任一通道中将动目标成像的结果叠加至静止目标图像上。

1 FMCW SAR 动目标信号模型

如图 1 是 FMCW SAR 观测动目标时的几何模型。假设载机以速度 v 沿着方位向 X 轴飞行, P_0 是观测场景中心的动目标,其初始位置为 $(0, y_0, 0)$,然后以速度 $(v_a, -v_r, 0)$ 开始做匀速运动。在 t 时刻,动目标从 P_0 点运动到 P_1 点, R_0 和 $R(t)$ 分别表示动目标在 0 时刻的最近斜距和 t 时刻的瞬时斜距。载机的飞行高度为 H , θ 为 SAR 天线的入射角,且 $\sin \theta = y_0/R_0$ 。

1.1 瞬时斜距

FMCW SAR 因其较长的扫频周期,导致载机

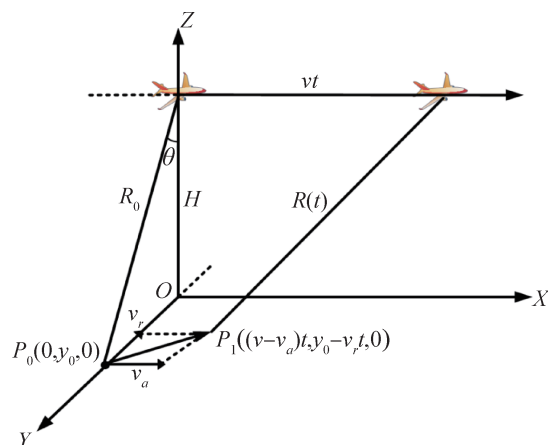


图 1 动目标成像几何模型

Fig. 1 Geometric model of moving target imaging

在发射与接收信号期间的连续运动不能忽略, 即瞬时斜距与距离向快时间有关, 对于传统脉冲 SAR 基于“停走停”假设的模型不再适用。由图 1 可得载机到动目标的瞬时斜距表达式为:

$$R(t) = \sqrt{[(v - v_a)t]^2 + (y_0 - v_r t)^2 + H^2} \quad (1)$$

其中, $t = t_a + t_r$, t_a 为慢时间变量, t_r 为快时间变量。对瞬时斜距进行三阶泰勒展开, 忽略距离向快时间 t_r 的二次项, 并且保留方位慢时间的三次项, 得到

$$R(t_r, t_a) \approx R_0 + \kappa_1 t_a + \kappa_1 t_r + \kappa_2 t_a^2 + 2\kappa_2 t_a t_r + \kappa_3 t_a^3 \quad (2)$$

式(2)中

$$R_0 = \sqrt{y_0^2 + H^2} \quad (3)$$

$$\kappa_1 = -v_r \sin \theta \quad (4)$$

$$\kappa_2 = [(v - v_a)^2 + v_r^2 \cos^2 \theta] / 2R_0 \quad (5)$$

$$\kappa_3 = v_r \sin \theta [(v - v_a)^2 + v_r^2 \cos^2 \theta] / 2R_0^2 \quad (6)$$

其中 $\kappa_i, i=1, 2, 3$ 是斜距 $R(t_r, t_a)$ 的各阶泰勒系数。

1.2 动目标回波信号模型

假设 FMCW SAR 发射的是线性调频信号, 通常对动目标回波信号进行去调频接收, 忽略信号包络以及幅度项, 表达式如下

$$s(t_r, t_a) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi K_r}{c} \left(t_r - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) [R(t_r, t_a) - R_{\text{ref}}] \right\} \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi R(t_r, t_a)}{\lambda} \right] \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi K_r}{c^2} [R(t_r, t_a) - R_{\text{ref}}]^2 \right\} \quad (7)$$

式中, K_r 为发射信号调频率; c 为光速; λ 为载波波长; R_{ref} 为参考斜距。最后一项为去调频处理所引入的残余视频相位(residual video phase, RVP), 因为其对动目标的回波信号影响相对较小, 所以在以下的推导中将其忽略。将瞬时斜距的表达式(2)代入式(7), 得到

$$s(t_r, t_a) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi K_r}{c} \left(t_r - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) (R_0 + \kappa_1 t_a + \kappa_2 t_a^2 + \kappa_3 t_a^3 - R_{\text{ref}}) \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \kappa_1 t_a \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \kappa_1 t_r \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} (R_0 + \kappa_2 t_a^2 + \kappa_3 t_a^3) \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{8\pi}{\lambda} \kappa_2 t_a t_r \right\} \quad (8)$$

观察式(8), 第 1 个指数项表示距离向信号的位置信息, 其中距离-方位的一次耦合项会导致回波包络的距离走动, 二次耦合项会导致回波包络的距离弯曲, 此外还存在三次距离徙动项, 同样会

对回波信号产生影响, 下文将会对其进行讨论。第 2 个指数项是动目标距离向速度 v_r 与方位慢时间构成的线性相位, 会让动目标的位置在方位向上产生偏移。其中动目标的多普勒中心可以表示为

$$f_{dc} = \frac{2}{\lambda} \frac{dR(t_r, t_a)}{dt_a} \Big|_{t_r=0, t_a=0} = \frac{2\kappa_1}{\lambda} \quad (9)$$

第 3 个指数项是动目标距离向速度 v_r 与距离快时间构成的线性相位, 会导致动目标的位置在距离向上发生偏移, 这一项是 FMCW SAR 相对于传统脉冲 SAR 所特有的。第 4 个指数项表示的是方位向信号, 决定方位向的聚焦, 可以看出, 如果采用场景静止目标的已知参数进行聚焦成像, 不仅会使动目标成像位置发生偏移, 同时还会导致动目标发生严重的散焦现象。其中动目标的多普勒调频率表示为

$$f_{dr} = \frac{2}{\lambda} \frac{d^2 R(t_r, t_a)}{dt_a^2} \Big|_{t_r=0, t_a=0} = \frac{4\kappa_2}{\lambda} \quad (10)$$

第 5 个指数项是在“非停走停”下载机持续运动引入的多普勒频移项, 同样是 FMCW SAR 相对于脉冲 SAR 所特有的相位信息, 为方位慢时间与距离快时间的一次耦合项, 该项会引起回波信号的距离走动, 一般先对其进行补偿。由于动目标速度信息未知, 因此构造近似的多普勒频移补偿函数为

$$H_{ds}(t_r, t_a) = \exp \left\{ j \frac{8\pi}{\lambda} \kappa_2' t_a t_r \right\} \quad (11)$$

其中, $\kappa_2' = v^2 / 2R_0$, 是系数 κ_2 忽略动目标速度后的表达式, 即只考虑载机速度引起的多普勒频移。将式(11)与式(8)相乘, 补偿后的信号合并为

$$s(t_r, t_a) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left((R_0 + \kappa_1 t_a + \kappa_2 t_a^2 + \kappa_3 t_a^3 - R_{\text{ref}}) \cdot \left[\frac{K_r \left(t_r - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right)}{f_c} + 1 \right] + \kappa_1 t_r \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R_{\text{ref}} \right\} \quad (12)$$

然后进行时频代换, 令 $f_r = K_r(t_r - 2R_{\text{ref}}/c)$, 忽略第二个对成像无影响的常数项后, 式(12)变为如下表达式

$$s(f_r, t_a) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[(R_0 + \kappa_1 t_a + \kappa_2 t_a^2 + \kappa_3 t_a^3 - R_{\text{ref}}) \cdot \left(\frac{f_r + f_c}{f_c} + \kappa_1 \left(\frac{f_r}{K_r} + \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right) \right] \right\} \quad (13)$$

2 动目标距离徙动校正

观察式(13)的回波信号,其中包含了线性距离徙动、二次距离徙动以及三次距离徙动,下面将对所有距离徙动项进行处理。

2.1 距离弯曲校正

对于采用载机速度进行距离弯曲校正的近似处理,并不能完全将距离弯曲给校正,导致难以将校正后的信号控制在一个距离分辨单元内,同时给后文的直线检测方法带来较大误差。因此在动目标速度信息未知的情况下,可以采用二阶Keystone变换进行解耦合以消除距离弯曲现象,即令

$$t_a = \left(\frac{f_c}{f_r + f_c} \right)^{1/2} \tau_a \quad (14)$$

其中, τ_a 为新的方位慢时间,将式(14)代入式(13)可以得到

$$s(f_r, \tau_a) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[(R_0 - R_{\text{ref}}) \left(\frac{f_r + f_c}{f_c} \right) + \left(\frac{f_c + f_r}{f_c} \right)^{1/2} \kappa_1 \tau_a + \left(\frac{f_c}{f_c + f_r} \right)^{1/2} \left(\kappa_3 \tau_a^3 + \kappa_2 \tau_a^2 + \kappa_1 \left(\frac{f_r}{K_r} + \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right) \right] \right\} \quad (15)$$

对式 $\left[(f_c + f_r)/f_c \right]^{1/2}$ 和 $\left[f_c/(f_c + f_r) \right]^{1/2}$ 分别作一阶泰勒展开,得到

$$s(f_r, \tau_a) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[(R_0 - R_{\text{ref}}) \left(\frac{f_r + f_c}{f_c} \right) + \left(1 + \frac{f_r}{2f_c} \right) \kappa_1 \tau_a + \left(1 - \frac{f_r}{2f_c} \right) \left(\kappa_3 \tau_a^3 + \kappa_2 \tau_a^2 + \kappa_1 \left(\frac{f_r}{K_r} + \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right) \right] \right\} \quad (16)$$

在式(16)中,此时方位慢时间二次项与距离频率的耦合已被解开,即距离弯曲被校正。其中距离走动量为 $\kappa_1 \tau_a / c$,可以发现距离走动项系数多了1/2,即走动量减小为原来的一半,此外信号中还存在三次距离徙动项。

2.2 距离走动校正与参数估计

本文采用Hough变换对距离走动进行校正。Hough变换的原理最早由Paul Hough提出,它可以直接描述图像与参数之间的映射关系,其基本思想是点与线之间的对偶性,也就是图像空间中共线的点对应在参数空间中相交的线。Hough变换的示意图如图2所示。

在图2中, $f(x)$ 是在 xy 平面上的一条直线,其中 O 为坐标原点, d 表示直线 $f(x)$ 与原点间法线

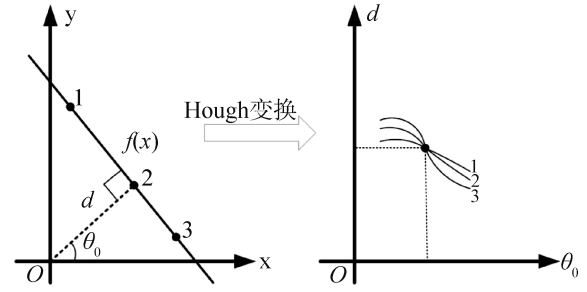


图2 Hough变换原理图

Fig. 2 Schematic diagram of Hough transform

的距离, θ_0 表示法线与 X 轴的夹角。因此,任意直线 $f(x)$ 都可以用 d 和 θ_0 两个参数确定,它们之间的映射关系可以表示为

$$d = x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0 \quad (17)$$

如果在图像空间中,即平面 xy 上的 n 个点共线,那么它在参数空间中对应的 n 条正弦曲线都会经过同一点。通过获取参数空间中相交点的值,可以确定与该直线相关的一组参数 (d, θ_0) ,本文主要采用Hough变换检测出直线的倾斜角度即可。图3是对距离徙动相位的分析,可以发现相比于式(16)中的三次距离徙动项,距离走动项是导致距离压缩后的回波信号产生倾斜的主要原因,因此三次距离徙动项对于Hough变换检测直线角度带来的误差可以忽略不计。

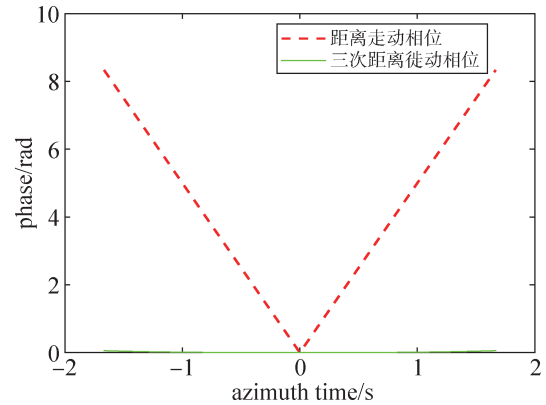


图3 距离徙动相位比较

Fig.3 Comparison of distance migration phases

假设某一个动目标距离压缩后的直线倾斜角度为 θ_r ,那么在采样点坐标系中,可以估计出距离向速度 v_r 的表达式为

$$v_r = - \frac{\tan \theta_r \cdot f_{\text{PRF}} \cdot c}{2F_s \cdot \sin \theta} \quad (18)$$

其中, f_{PRF} 是方位向的脉冲重复频率, F_s 是距离向

的采样频率。此时可以得出系数 κ_1 的值, 构造距离走动以及方位多普勒中心偏移的校正函数为

$$H_{\text{walk}}(f_r, \tau_a) = \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \left(1 + \frac{f_r}{2f_c} \right) \kappa_1 \tau_a \right\} \quad (19)$$

将式(19)与式(16)相乘, 经过补偿后的回波信号变为

$$s(f_r, \tau_a) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[(R_0 - R_{\text{ref}}) \left(\frac{f_r + f_c}{f_c} \right) + \kappa_1 \left(\frac{f_r}{K_r} + \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) + \kappa_2 \tau_a^2 + \left(1 - \frac{f_r}{2f_c} \right) \kappa_3 \tau_a^3 \right] \right\} \quad (20)$$

与文献[12]相比, 采用一阶Keystone变换只能将不存在多普勒模糊的距离走动进行校正, 而且不能估计出动目标的距离向速度。而Hough变换可以在估计动目标距离向速度的同时将距离走动完全校正。图4(a)和4(b)是两种方法对同一动目标进行距离走动校正的结果。可以发现, 对于高速

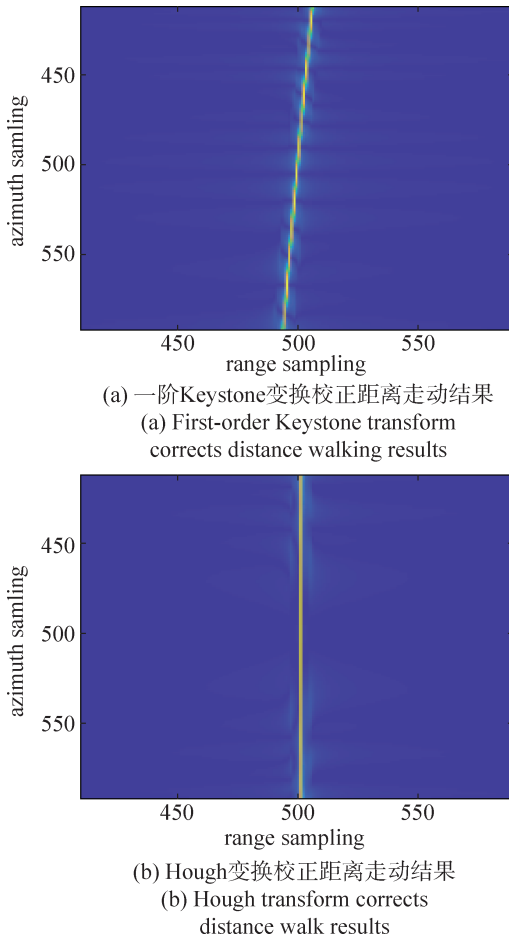
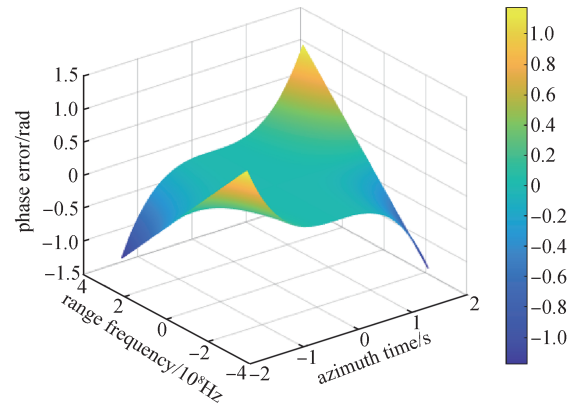


图4 两种方法对距离走动校正结果比较

Fig. 4 Comparison of distance walk correction results between the two methods

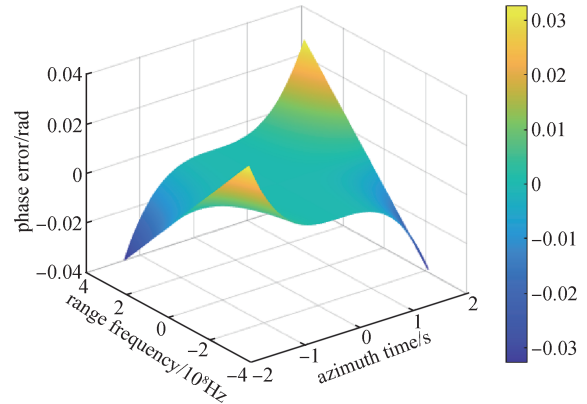
动目标而言, 采用Hough变换进行距离走动校正的效果要更优于一阶Keystone变换。

观察式(20), 此时还存在三次距离徙动项。由图5(a)、5(b)可知, 由载机速度和动目标距离向速度所引起的三次距离徙动相位误差大于 $(\pi/4)$ rad, 因此需要对该部分相位进行补偿, 而仅由动目标方位向速度引起的三次距离徙动相位误差小于 $(\pi/4)$ rad, 这部分相位误差可以忽略不计。



(a) 载机速度和动目标距离向速度引起的三次距离徙动相位误差

(a) Phase error of three range migrations by the velocity of carrier aircraft and the range velocity of moving target



(b) 动目标方位向速度引起的三次距离徙动相位误差
(b) error of three range migrations by the azimuth velocity of moving target

图5 三次距离徙动相位误差

Fig. 5 Third-order distance migration phase error

忽略动目标方位向速度, 构造三次距离徙动校正函数为

$$H_r(f_r, \tau_a) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi\kappa'_3}{c} f_r \tau_a^3 \right\} \quad (21)$$

其中, $\kappa'_3 = v_r \sin \theta [v^2 + v_r^2 \cos^2 \theta] / 2R_0^2$, 是系数 κ_3 忽略动目标方位向速度后的表达式, 式(21)与式(20)相乘后, 信号为

$$s(f_r, \tau_a) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[(R_0 - R_{\text{ref}}) \left(\frac{f_r + f_c}{f_c} \right) + \kappa_1 \left(\frac{f_r}{K_r} + \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) + \kappa_2 \tau_a^2 + \kappa_3 \tau_a^3 \right] \right\} \quad (22)$$

式(22)中的常数项对成像没有影响, 可以忽略。然后对其进行距离向逆傅里叶变换即可完成距离压缩, 如式(23)所示:

$$s(t_r, \tau_a) = \sin c \left\{ \frac{1}{T_p} \left[t_r - \frac{2}{c} (R_0 - R_{\text{ref}}) + \frac{2\kappa_1}{\lambda K_r} \right] \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} (\kappa_2 \tau_a^2 + \kappa_3 \tau_a^3) \right\} \quad (23)$$

3 方位向速度估计与成像

时频分析是能直接且有效地反映出非平稳信号时变特征, 并且准确地得出信号的时间与频率之间关系的方法。由于FMCW SAR接收的回波信号同样为线性调频信号, 而且Wigner-Ville分布对

线性调频信号有着很好的聚集性。通过跟Hough变换相结合(Wigner-Hough)去估计动目标的多普勒调频率, 假设 θ_a 是某一个动目标的方向向信号进行Wigner-Ville分布时的倾斜角度, 那么估计出多普勒调频率为

$$f_{dr} = \tan \theta_a \quad (24)$$

此时可以得到 $\kappa_2 = f_{dr} \cdot \lambda/4$, 进而推导出动目标方位向的估计速度 v_a 为

$$v_a = v - \sqrt{2R_0 \kappa_2 - v_r^2 \cos^2 \theta} \quad (25)$$

由于动目标的速度都已估计出, 此时系数 κ_3 的值便也可以得到, 然后可对动目标进行方位压缩, 方位向的脉冲压缩函数可以表示为

$$H_a(t_r, \tau_a) = \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} (\kappa_2 \tau_a^2 + \kappa_3 \tau_a^3) \right\} \quad (26)$$

最后, 对式(26)方位向傅里叶变换即可完成聚焦成像, 再通过将动目标成像结果叠加至静止目标图像上即可完成整个场景的成像效果。动目标成像算法的流程图如图6所示。

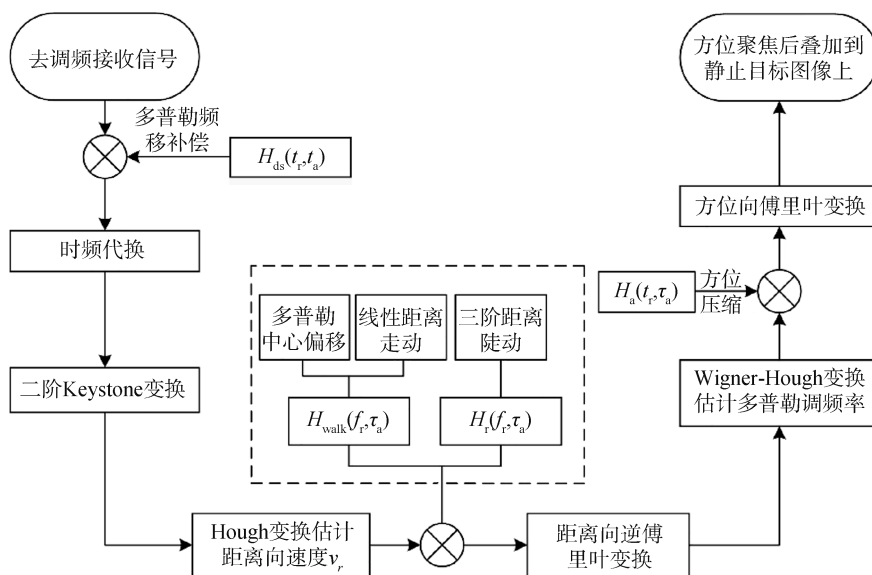


图6 FMCW SAR 动目标成像与参数估计流程图

Fig.6 Moving target imaging and parameter estimation flow chart of FMCW SAR

4 仿真结果

通过仿真实验评估本文FMCW SAR系统下动目标成像性能和参数估计的准确性, 设置5个点目标的回波数据进行仿真实验, 其中包含3个静止目标(T1,T4,T5), 以及2个速度大小不同的动目标(T2,T3)。FMCW SAR在正侧视条带模式下工作, 主要

工作参数见表1, 5个点目标的参数信息见表2。

本文动目标成像和参数估计是基于DPCA动目标检测后进行的, 如图7(a)和7(b)是在两个通道中将信号距离压缩后的结果, 从图7(c)中可以看到, 在两个通道中将静止目标对消后只剩下了动目标。

检测出两个动目标后, 采用二阶Keystone变

表 1 雷达系统主要参数
Table 1 Main parameters of radar system

参数	数值
载波频率/GHz	25
发射信号带宽/MHz	180
发射信号时宽/ms	0.6
脉冲重复频率/Hz	1 000
场景中心斜距/m	1 000
载机速度/(m·s ⁻¹)	90
合成孔径时间/s	6
天线入射角/(°)	45

表 2 5 个点目标参数
Table 2 Parameters of 5 point targets

点目标	T1	T2	T3	T4	T5
距离斜距/m	900	950	1 000	1 050	1 100
距离向速度 v_r /(m·s ⁻¹)	0	10	18	0	0
方位向速度 v_a /(m·s ⁻¹)	0	15	20	0	0

变换耦合以校正距离弯曲现象, 结果如图 8(a)所示。接着用 Hough 变换估计图像中直线斜率, 求解出动目标的距离向速度, 并据此进行距离走动和三阶距离徙动校正, 可见图 8(b)中距离徙动已被完全校正。图 8(c)是对二次项方位信号进行 Wigner-Vill 分布的结果, 再次采用 Hough 变换检测直线角度可求解出动目标的方位向速度, 同时得到二阶和三阶多普勒参数, 根据估计的参数构造方位匹配函数完成聚焦成像, 最终将聚焦成像后的动目标叠加至静止目标图像上。图 8(d)是在本文算法下的最终成像结果, 从左往右第二个和第三个分别为动目标 T2 和 T3, 可以发现此时动目标不仅位置正确, 而且聚焦效果较好。表 3 是对两个动目标参数估计的结果, 本文通过提高直线检测角度的精度使速度估计更为准确, 可以发现动目标的速度估计结果与真实速度之间的误差较小。

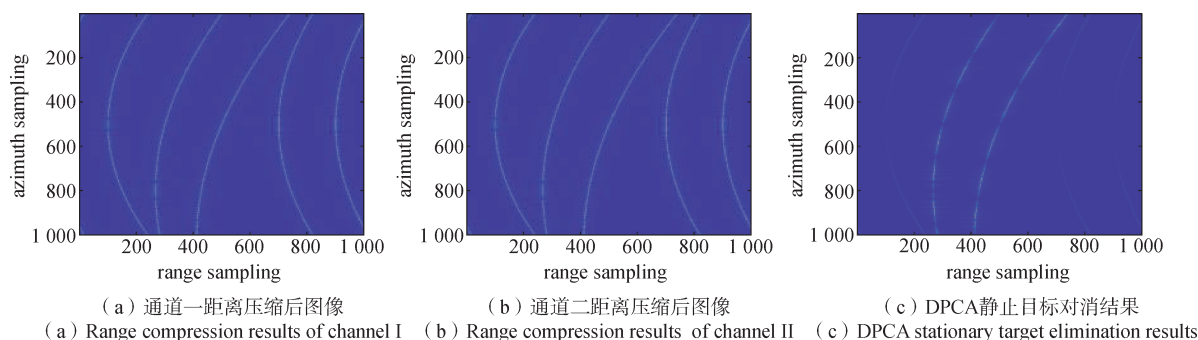


图 7 动目标检测结果

Fig.7 Moving target detection results

为了更好地体现本文算法下的动目标成像效果, 将文献[16]的方法与本文算法进行比较。文献[16]基于“停走停”模式提出二阶斜距的动目标成像算法, 没有考虑三阶多普勒相位给成像带来的影响。图 9 是对两个速度不同的动目标采用不同算法进行成像得到的高线图, 可以发现本文算法对于两个动目标的聚焦效果更好。此外, 为了更清晰地比较两种算法的具体效果, 图 10 是不同算法下的两个动目标方位脉冲剖面图比较, 由于文献[16]只补偿了二阶多普勒相位, 其中红色所示的方位向剖面图的副瓣是不具备对称性的, 而本文所提方法在“非停走停”模式下, 通过精确估计出动目标的速度参数, 同时补偿了三阶多普勒相位,

使得其方位向剖面图的副瓣是对称的, 如图 10 中绿色的方位向剖面图所示。表 4 比较了两种算法下的动目标性能参数, 可以发现相较于文献[16]算法, 本文算法在方位向的成像效果上, 峰值旁瓣比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR)都要更优于文献[16]算法, 表现出良好的聚焦性能。

5 结束语

随着雷达技术的发展, FMCW SAR 在军用与民用领域的应用日益广泛, 然而对于 FMCW SAR 体制下的动目标检测与成像研究相对较少。对于“非停走停”模式下的 FMCW SAR 动目标成像与参数估计, 本文通过补偿多普勒频移项和引入时

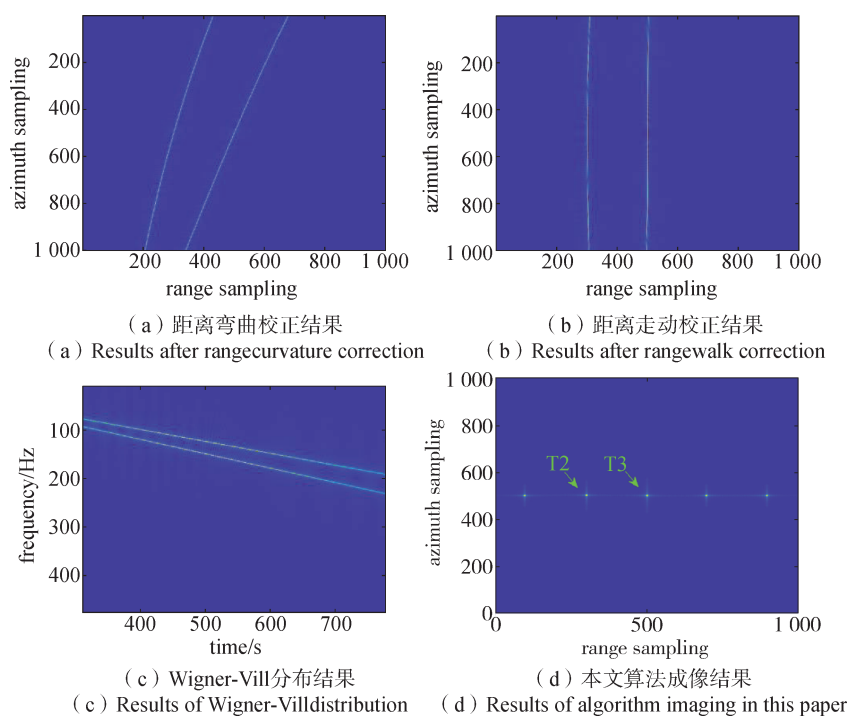


图 8 动目标成像的仿真过程

Fig.8 Simulation process of moving target imaging

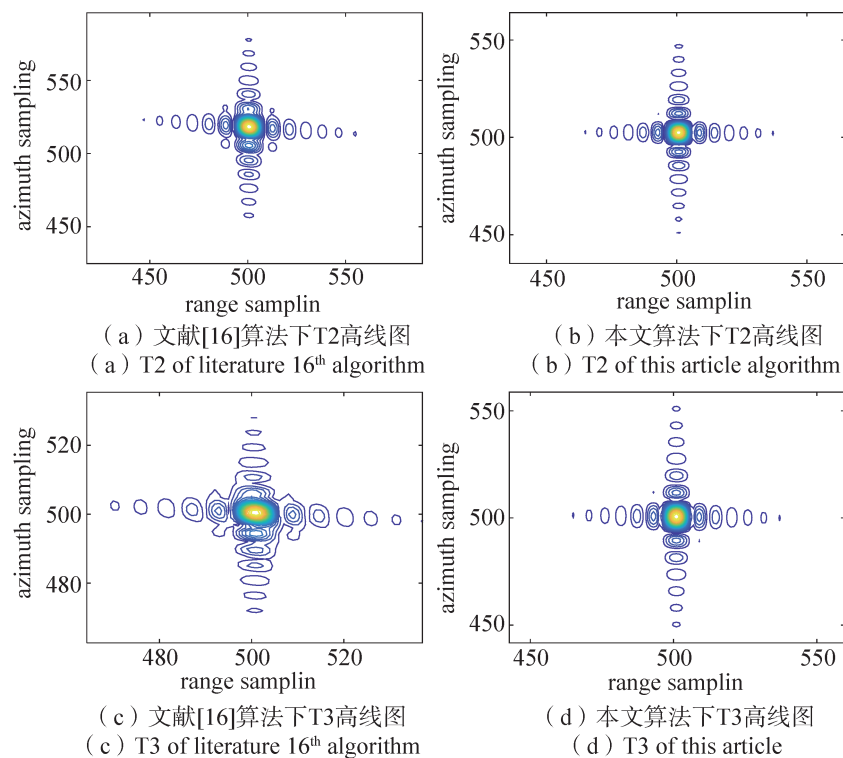


图 9 不同算法下动目标高线图比较

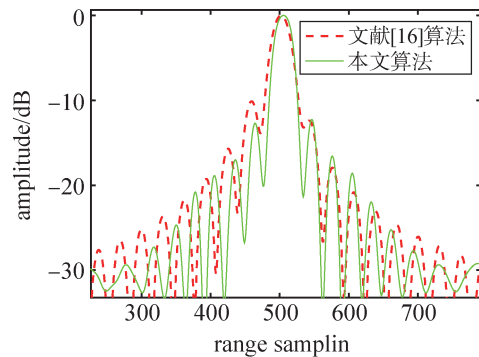
Fig.9 Comparison of downward moving target height charts by different algorithms

频代换, 进而提出二阶 Keystone 变换校正距离弯曲。然后用 Hough 变换估计动目标的距离向速度,

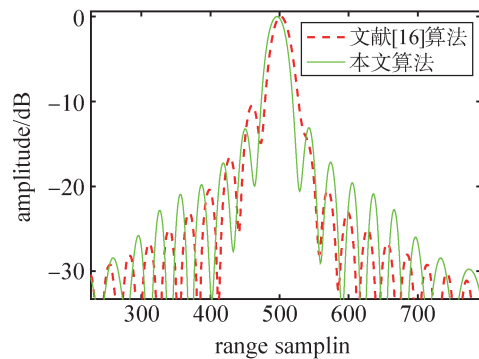
并据此完成多普勒中心偏移、线性距离走动和三次距离徙动校正。最后通过 Wigner-Hough 变换估

表3 动目标参数估计结果
Table 3 Results of estimation of moving target parameters

动目标	真实 v_r / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	估计 v_r / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	误差 率/%	真实 v_a / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	估计 v_a / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	误差 率/%
T2	10	10.01	0.10	15	14.96	0.27
T3	18	17.92	0.44	20	19.96	0.20



(a) T2方位向剖面图比较
(a) Comparison of T2 azimuth profile



(b) T3方位向剖面图比较
(b) Comparison of T3 azimuth profiles

图 10 不同算法下动目标方位剖面图比较
Fig.10 Comparison of moving target azimuth profiles of different algorithms

表4 不同算法的点目标性能分析
Table 4 Point target performance analysis of different algorithms

动目标	算法	方位向		距离向	
		PSLR/ dB	ISLR/ dB	PSLR/ dB	ISLR/ dB
T2	文献[16]算法	-11.48	-9.98	-12.10	-10.61
	本文算法	-13.29	-10.50	-13.29	-10.66
T3	文献[16]算法	-10.96	-9.21	-12.74	-11.01
	本文算法	-13.17	-10.63	-13.10	-10.60

计出多普勒调频率, 进而得到动目标方位向速度和三阶多普勒相位。本文通过补偿信号的三阶多普勒相位, 使得动目标的方位向剖面图副瓣具有对称性, 所提算法能适用于“非停走停”下的 SAR 匀速动目标成像。加速度的存在会导致更高阶相位误差和参数估计的复杂度, 因此含加速度曲线运动的动目标成像将是之后的研究方向。

参考文献

- [1] 王岩, 杨天笑, 丁泽刚, 等. 星载双基地 FMCW-SAR 高分辨时域成像算法[J]. 信号处理, 2022, 38(1): 35-42.
WANG Yan, YANG Tianxiao, DING Zegang, et al. High resolution time domain imaging algorithm for spaceborne bistatic FMCW-SAR[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(1): 35-42.
- [2] CASALINI E, FAGIR J, HENKE D, et al. Moving target refocusing with the FMCW SAR system miranda-35[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14(1): 1283-1291.
- [3] CASALINI E, FRIOD M, SMALL D, et al. Refocusing FMCW SAR moving target data in the wavenumber domain[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(6): 3436-3449.
- [4] 王金伟, 周峰, 吴玉峰, 等. FMCW-SAR 体制下快速运动目标检测与成像方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11): 2684-2690.
WANG Jinwei, ZHOU Feng, WU Yufeng, et al. Fast moving target detection and imaging method under FMCW-SAR system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(11): 2684-2690.
- [5] 丁柏圆, 闫海鹏, 黄光泉, 等. 高速平台下动目标高分辨成像方法研究[J]. 遥测遥控, 2021, 42(6): 98-106.
DING Baiyuan, YAN Haipeng, HUANG Guangquan, et al. Research on high-resolution imaging method of downward moving target of high-speed platform[J]. Telemetry Remote Control, 2021, 42(6): 98-106.
- [6] ZHANG Yuan, SUN Jinping, LEI Peng, et al. High-resolution SAR based ground moving target imaging with defocused ROI data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(2): 1062-1073.
- [7] JIANG Nan, WANG Jian, FENG Dong, et al. SAR imaging method for moving target with azimuth missing data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 7100-7113.
- [8] QIAN Guangzhao, WANG Yong. Monostatic-equivalent algorithm via Taylor expansion for bi-SAR ship target

- imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 1-19.
- [9] DONG Qi, XING Mengdao, XIA Xianggen, et al. Moving target refocusing algorithm in 2-D wavenumber domain after BP integral[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15: 127-131.
- [10] ZHU Chengbin, GUAN Yifu. Study of ground moving target parameters estimation and imaging for mini-SAR[C]// International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC). Chengdu, China, 2017: 587-591.
- [11] 申晓天, 郑明洁. 一种新的基于FRFT的动目标测速和定位方法[J]. 中国科学院大学学报, 2023, 40(1): 84-92. SHEN Xiaotian, ZHENG Mingjie. A new method for speed measurement and localization of moving target based on FRFT[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2023, 40(1): 84-92.
- [12] HUANG Penghui, XIA Xianggen, LIAO Guisheng, et al. Ground moving target imaging based on Keystone transform and coherently integrated CPF with a single-channel SAR[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(12): 5686-5694.
- [13] 王玉莹, 张志敏, 李宁, 等. 高分宽幅SAR系统下的方位多通道运动目标成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(3): 541-546. WANG Yuying, ZHANG Zhimin, LI Ning, et al. Research on azimuth multi-channel moving target imaging algorithm under high-resolution wide-amplitude SAR system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(3): 541-546.
- [14] 熊世超, 倪嘉成, 张群, 等. 基于频谱旋转w-k算法的大斜视SAR地面动目标成像[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(10): 3104-3114. XIONG Shichao, NI Jiacheng, ZHANG Qun, et al. Imaging of large strabismus SAR ground moving target based on spectral rotation w-k algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(10): 3104-3114.
- [15] XU Weidi, WANG Bingnan, XIANG Maosheng, et al. A novel autofocus framework for UAV SAR imagery: Motion error extraction from symmetric triangular FMCW differential signal[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-15.
- [16] CHEN Zhanye, LI Li, WAN Jun, et al. Efficient ground moving target imaging method for synthetic aperture radar with target azimuth ambiguity[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(20): 23297-23307.
- [17] YANG Jiefang, ZHANG Yunhua. An airborne SAR moving target imaging and motion parameters estimation algorithm with azimuth de-chirping and the second-order Keystone transform applied[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(8): 3967-3976.
- [18] HUANG Penghui, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, et al. Ground maneuvering target imaging and high-order motion parameter estimation based on second-order Keystone and generalized Hough-HAF transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55: 320-335.
- [19] ZENG Cao, LI Dong, LUO Xi, et al. Ground maneuvering targets imaging for synthetic aperture radar based on second-order Keystone transform and high-order motion parameter estimation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(11): 4486-4501.
- [20] YOU Dong, SUN Guangcai, XING Mengdao, et al. SAR ground maneuvering targets imaging and motion parameters estimation based on the adaptive polynomial Fourier transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5.
- [21] DU Huagui, SONG Yongping, JIANG Nan, et al. A novel SAR ground maneuvering target imaging method based on adaptive phase tracking[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023.
- [22] LI Zhongyu, ZHANG Xiaodong, QING Yang, et al. Hybrid SAR-ISAR image formation via joint FRFT-WVD processing for BFSAR ship target high-resolution imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-13.
- [23] WU D M, KIANG J F. Dual-channel airborne SAR imaging of ground moving targets on perturbed platform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 1-14.
- [作者简介]
- 贺 靖 1999年生, 硕士研究生。
- 谭鸽伟 1970年生, 博士, 研究生导师。
- (本文编辑: 潘三英)