

文章编号: 2095-4980(2024)06-0638-09

太赫兹 CSAR 运动目标距离速度估计与重定位方法

龙 娜^b, 李 晋^{*a,b}, 邝彩杰^b, 李玉亮^b, 闵 锐^b, 皮亦鸣^b

(电子科技大学 a.深圳高等研究院, 广东 深圳 518038; b.电子科技大学, 信息与通信工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 圆周合成孔径雷达(CSAR)中, 由于雷达平台绕观测场景圆周飞行, 雷达和地面目标之间的距离方程复杂, 目标的距离向参数和方位参数之间有复杂的耦合关系, 导致单独估计运动目标距离向速度参数的难度加大。提出一种基于子孔径分解的太赫兹 CSAR 运动目标距离向速度估计方法, 选择合适的子孔径角度, 对 CSAR 进行子孔径分解, 在子孔径条件下, 通过小角度近似, 可以实现运动目标距离向速度和其他参数间的解耦合, 准确估计运动目标的距离向速度, 实现运动目标的精确重定位。仿真和实测数据验证了该算法的有效性。

关键词: 重定位; 速度估计; 圆周合成孔径雷达; 子孔径分解

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024058

A range velocity estimation and relocation method for ground moving targets of terahertz CSAR

LONG Na^b, LI Jin^{*a,b}, KUANG Caijie^b, LI Yuliang^b, MIN Rui^b, PI Yiming^b

(a.Shenzhen Institute for Advanced Study, Shenzhen Guangdong 518038, China; b.School of Communications and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: In Circular Synthetic Aperture Radar(CSAR), the range equation between radar and ground moving target is complicated because the radar platform flies around the circumference of the observation scene, and there is a complex coupling relationship between range direction parameters and azimuth direction parameters of target, which makes it difficult to estimate the range velocity of moving target independently. A method for estimating the range velocity of moving target in terahertz CSAR based on sub-aperture division is proposed. By selecting a suitable angle of sub-apertures, sub-aperture division is performed on CSAR. Under the condition of sub-aperture, the decoupling between the range velocity of moving target and other parameters can be realized by small angle approximation, and the range velocity of moving target can be accurately estimated, which can achieve accurate relocation of moving target. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by simulation and measured data.

Keywords: relocation; velocity estimation; Circular Synthetic Aperture Radar; sub-aperture division

太赫兹雷达具有波长短、带宽大、穿透力强和分辨力高等特点, 太赫兹圆周合成孔径雷达(CSAR)成像模式可以对场景和场景中的运动目标实现实时成像与监测。运动目标的速度会导致成像结果的偏移和散焦^[1-4], 使得监测时出现偏差。如何找到一种在保证精确度的同时又能够快速对运动目标进行重定位的方法, 是一个亟待解决的问题。目前常用的重定位方法是针对条带合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像模式, 如最大似然估计法^[5], 此方法需要在杂波抑制的前提下进行, 对于一些慢速运动目标, 可能会被抑制掉。文献[6]基于路网信息辅助补偿目标成像位置与真实位置之间的偏差, 可实现目标参数估计和定位功能, 但该方法需要用到干涉信息, 且实现过程较为复杂。还有参数穷举搜索方法, 通过对目标运动速度进行穷举估计, 然后根据估计的速度对目标进行补偿, 运算负担较大, 效率较低, 另外, 这种方法成立的前提是条带 SAR 中可以忽略目标方位

收稿日期: 2024-01-24; 修回日期: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071100; 6197110); 国防科技创新特区基金资助项目(23-TQ03-02-ZT-01-01); 基础加强计划技术领域基金资助项目(2023-JCJQ-JJ-0118)

*通信作者: 李 晋 email:lijin@uestc.edu.cn

向速度对多普勒频率的影响。然而，在 CSAR 中，由于飞机运动轨迹为圆弧形，雷达平台和地面目标之间的距离方程复杂，各变化参数之间有复杂的耦合关系，导致单独估计动目标距离向速度参数的难度加大。目前针对 CSAR 运动目标精确聚焦的研究较少，王武提出利用频域提取的非参数化方法对 CSAR 运动目标进行聚焦^[7]，文献[8]将 ISAR 技术引入到 CSAR 运动目标重聚焦中。上述方法应用在 Ka 波段和 X 波段，且都是基于非参数化的方法，在太赫兹波段下，雷达对目标的运动更加敏感，成像结果的偏移和散焦现象更加严重，若想准确估计运动目标的距离向速度，需要采取合适的方法进行估计。

本文提出了一种基于子孔径分解的太赫兹 CSAR 运动目标距离向速度估计方法，通过选择合适的子孔径角度，对 CSAR 进行子孔径分解，在子孔径条件下，通过小角度近似，可以实现运动目标距离向速度和方位向速度间的解耦合，通过多普勒中心频率的估计来实现运动目标的距离向速度估计，还能利用估计的距离向速度实现运动目标的精确重定位。

1 信号模型

CSAR 是聚束 SAR 成像的一种方式，飞机绕场景做圆周运动，雷达发射的波束始终指向地面的场景中心，实现对场景的长时间、360°观测。如图 1(a)所示，以成像场景中心 o 为坐标原点，建立空间直角坐标系 xyz ，雷达平台绕 z 轴以半径 R 作匀速圆周运动，速度为 V ，飞行平面与观测场景平面平行，二者高度差为 H 。飞行过程中，雷达波束中心始终指向观测场景中心 o 点，在一段时间内，飞机从 P 点飞到 P' 点，雷达在场景中心的投影与场景中心 o 的连线与 y 轴夹角为 φ ，如图 1(b)，假设雷达开始飞行时， $\varphi=0$ 。观测场景中，存在一个运动的目标 Q ，其初始位置为 (x_0, y_0) ，以速度 v 匀速运动到 Q' 。 v_x 与 v_y 分别为 v 在 x 轴和 y 轴上的速度分量，其中， v_x 为方位向速度， v_y 为距离向速度。

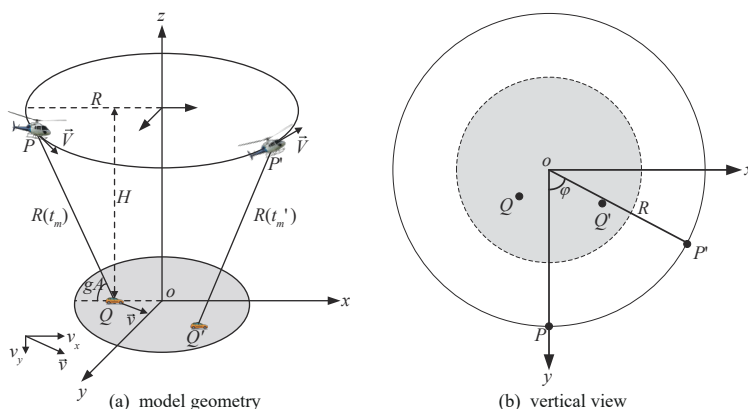


Fig.1 Geometry of CSAR aircraft and target
图 1 CSAR 飞机与目标模型图

根据图 1(a)，在任意时刻 t_m (t_m 为雷达信号慢时间)，雷达与目标的瞬时距离为：

$$\begin{cases} R(t_m) = \sqrt{R_x(t_m)^2 + R_y(t_m)^2 + H^2} \\ R_x(t_m) = R \sin \varphi - (x_0 + v_x t_m) \\ R_y(t_m) = R \cos \varphi - (y_0 + v_y t_m) \\ \varphi = V t_m / R \end{cases} \quad (1)$$

对 $R(t_m)$ 在 $t_m = t_{n_0}$ 处进行泰勒展开，

$$\begin{aligned} R(t_m) &= \sqrt{[R \sin \varphi - (x_0 + v_x t_m)]^2 + [R \cos \varphi - (y_0 + v_y t_m)]^2 + H^2} = \\ &R(t_{n_0}) + R'(t_{n_0})(t_m - t_{n_0}) + \frac{1}{2} R''(t_{n_0})(t_m - t_{n_0})^2 + O(t_m - t_{n_0})^3 \end{aligned} \quad (2)$$

其中,

$$R'(t_{n_0}) = \frac{[x_0 + v_x t_{n_0} - R \sin(\varphi)][v_x - V \cos(\varphi)] + [y_0 - R \cos(\varphi)][v_y + v_y t_{n_0} + V \sin(\varphi)]}{R(t_{n_0})} \quad (3)$$

式中: $R(t_{n_0})$ 为雷达与目标间的初始距离; $R''(t_{n_0})$ 为泰勒展开的二次项系数; $O(t_m - t_{n_0})^3$ 为泰勒展开的余项。

假设雷达发射线性调频信号, 照射到地面上一个与雷达瞬时距离为 $R(t_m)$ 的运动目标上, 为了降低太赫兹 SAR 回波信号的采样率, 采用去调频处理来进行脉冲压缩, 由文献[9]可知, 去调频后的回波信号形式为:

$$S_{dc}(t_r, t_m) = \sigma \text{rect}\left(\frac{t_r - 2R/c}{T_r}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} K_\gamma (t_r - 2R_{\text{ref}}/c) R_\Delta\right) \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} f_c R_\Delta + j \frac{4\pi K_\gamma}{c^2} R_\Delta^2\right) \quad (4)$$

式中: t_r 为雷达信号快时间; σ 为后向散射系数; T_r 为信号脉冲宽度; c 为光速; K_γ 为线性调频信号的调频斜率; R_{ref} 为参考斜距; $R_\Delta = R(t_m) - R_{\text{ref}}$ 为去调频后的剩余斜距; f_c 为载频。

然后对快时间 t_r 做傅里叶变换, 得到距离频域方位时域信号为:

$$S_{dc}(f_r, t_m) = \sigma T_r \sin c\left[T_r\left(f_r + 2 \frac{K_\gamma}{c} \Delta R\right)\right] \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} f_r \Delta R\right) \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} f_c \Delta R\right) \exp\left(j \frac{4\pi K_\gamma}{c^2} \Delta R^2\right) \quad (5)$$

其中, 第 1 个指数项为回波包络斜置项, 第 3 个指数项为剩余视频项(Residual Video Phase, RVP), 需要进行去除, 去除后的信号为:

$$S(f_r, t_m) = \sigma T_r \sin c\left[T_r\left(f_r + 2 \frac{K_\gamma}{c} R_\Delta\right)\right] \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} f_c R_\Delta\right) \quad (6)$$

式(6)中的相位项为雷达接收到的回波信号方位向相位, 即:

$$-\frac{4\pi}{c} f_c R_\Delta = -\frac{4\pi}{c} f_c \left[R(t_{n_0}) + R'(t_{n_0})(t_m - t_{n_0}) + \frac{1}{2} R''(t_{n_0})(t_m - t_{n_0})^2 - R_{\text{ref}} \right] \quad (7)$$

由式(3)和式(7), 可推出多普勒中心频率为:

$$f_{dc} = -\frac{2f_c}{c} \left\{ [x_0 + v_x t_{n_0} - R \sin \varphi][v_x - V \cos \varphi] + [y_0 - R \cos \varphi][v_y + v_y t_{n_0} + V \sin \varphi] \right\} \quad (8)$$

可见, 在 CSAR 中, 目标的距离向速度和方位向速度都会带来额外的多普勒中心偏移, 如果使用静止场景成像算法的参考函数进行补偿, 会发生参数失配现象。在传统的条带 SAR 中, 一般可以忽略距离向速度对多普勒调频率的影响, 以及方位向速度对多普勒中心的影响, 因此, 在条带 SAR 中, 目标的偏移主要由距离向速度带来, 而散焦主要由方位向速度造成。相比条带 SAR, CSAR 运动目标的距离向速度和方位向速度耦合在一起, 导致单独估计距离向速度的过程更为复杂。

2 算法原理

2.1 子孔径划分

由于飞机运动轨迹为圆弧形, 雷达平台和地面目标之间的距离方程复杂, 各变化参数之间有复杂的耦合关系, 导致动目标参数估计难度大。因此, 在处理时, 常采用划分子孔径的方式来降低距离向和方位向参数间的耦合。如图 2 所示, 将完整的圆周孔径划分为 N 个子孔径, 在每个子孔径下, 以子孔径中心对应的延伸线为 y 轴, 以子孔径中心的切线为 x 轴。在子孔径条件下, 根据推导得到飞机飞过的角度很小, 在飞过此角度所经历的短时间内可以认为目标的速度保持恒定。假设在第 n 个子孔径内, 开始时间为 $t_{n,0} = 0$ 。

根据 SAR 成像的基本理论, 雷达图像的距离分辨率为:

$$\rho_r = \frac{c}{2B \cos(gA)} \quad (9)$$

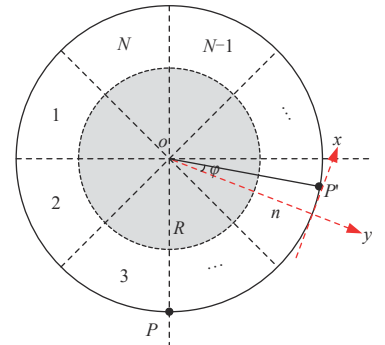


Fig.2 Diagram of sub-aperture division
图 2 子孔径划分示意图

式中： B 为雷达系统带宽； gA 为擦地角。雷达图像的方位分辨力为：

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\varphi \cos(gA)} \quad (10)$$

式中 λ 为波长。为了防止 SAR 图像出现压缩展宽现象，通常保持距离向和方位向的分辨力一致，即：

$$\rho_r = \rho_a \quad (11)$$

联立式(9)~式(11)，可得：

$$\varphi = \frac{\lambda B}{c} = \frac{B}{f_c} \quad (12)$$

在太赫兹成像模式下，带宽一般在 10^8 量级，而载频在 10^{11} 量级，此时 φ 的值非常小，并以此为依据来划分子孔径。经过孔径划分后，可以利用小角近似原理。在小角近似的条件下，

$$\begin{cases} \sin \varphi \approx \varphi = Vt_m/R \\ \cos \varphi \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2} = 1 - \frac{V^2 t_m^2}{2R^2} \end{cases} \quad (13)$$

假设以子孔径中心为 $t_m = 0$ 时刻，此时，式(8)中，

$$\begin{cases} x_0 + v_x t_{n_0} - R \sin \varphi \approx x_0 \\ y_0 - R \cos \varphi \approx y_0 - R \\ v_x - V \cos \varphi \approx v_x - V \\ v_y + v_y t_{n_0} + V \sin \varphi \approx v_y \end{cases} \quad (14)$$

$$R'(t_{n_0}) = \frac{x_0(v_x - V) + (y_0 - R)v_y}{R(t_{n_0})} \approx v_y \cos(gA) \quad (15)$$

式(15)利用了远场近似，认为目标与雷达的初始距离 $R(t_{n_0})$ 远远大于 x_0 与 y_0 。

根据式(8)及式(15)，回波的多普勒中心频率为：

$$f_{dc} = \frac{2f_c R'(t_{n_0})}{c} = \frac{2f_c v_y \cos(gA)}{c} \quad (16)$$

此时回波的多普勒中心频率只与目标的距离向速度相关，与方位向速度无关，通过以上方法，实现了运动参数之间的解耦合。

2.2 多普勒中心频率粗估计

由式(16)，目标的运动会带来额外的多普勒中心偏移，使得成像结果偏离其本身的位置，因此，对目标的多普勒参数进行估计是实现速度估计和目标重定位的关键所在。运动目标的回波可以近似为线性调频信号，因此，许多时频分析方法可以用于运动目标参数估计，如 Winger-Ville 分布(Winger-Ville Distribution, WVD)^[10]，平滑 Winger-Ville 分布(Smoothed Winger-Ville Distribution, SWVD)，小波变换^[11]以及短时傅里叶变换(Short-time Fourier Transform, STFT)^[12-13]，其中 WVD 对线性调频信号的时频分辨力最高，但是存在较严重的交叉项干扰；SWVD 分布能够在保留 WVD 分布的时频分辨力同时很好地抑制交叉项干扰；小波变换的时间窗可以根据频率变化而自适应伸缩，比较灵活，在低频慢波和高频快波的分析中都能表现出较好的频率分辨力，但也存在交叉项干扰；由于窗函数的影响，STFT 的时频分辨力与窗的尺寸有关，需要在时间分辨力和频率分辨力之间进行折中选择。STFT 是时频分析方法中最简单的一种，也是使用最广泛的一种，针对本方法可以估计出多普勒中心频率，因此本文采用 STFT 进行时频线提取。

对于去斜后的距离频域方位时域信号 $S(f_r, t_m)$ ，其短时傅里叶变换为：

$$S_{\text{STFT}}(f_r, t_m, f_m) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f_r, \tau) h(\tau - t_m) e^{-j2\pi f_m \tau} d\tau \quad (17)$$

式中： f_m 为雷达信号的方位向频率变量； $h(t_m)$ 为窗函数。

在应用中, 需要进行窗函数选择, 本方法采用汉明窗。选择窗函数以后, 还需要进行窗长度的选择, 窗函数的长度关系着频谱图的时间和频率分辨率。在进行 STFT 变换前, 需要采用传统成像算法对回波数据进行成像, 这里采用 CSAR 中常用的极坐标格式算法(Polar Format Algorithm, PFA)^[14]。经 PFA 算法成像后, 由目标本身和雷达之间相对运动产生的距离徙动已经消除掉, 剩余的多普勒中心偏移即为目标运动所带来的, 因此利用 STFT 变换得到的时频线的截距即为运动目标的多普勒中心频率的粗估计。

2.3 多普勒模糊数估计

实际情况中, 当目标距离向速度大于 $\lambda f_{PR}/4$ 时^[15](f_{PR} 为雷达发射信号的脉冲重复频率), 多普勒模糊的情况不可避免, 由上述方法得到的多普勒中心频率的粗估计值不一定是多普勒中心频率的实际值, 因此需要将多普勒模糊的情况考虑在内。假设多普勒模糊数为 M , 则实际的多普勒中心频率为:

$$f_{dc} = f_{dco} + M \times f_{PR} \quad (18)$$

式中 f_{dco} 为由 2.2 节得到的多普勒中心频率的粗估计值。

由于模糊度数为整数, 且地面目标的距离向速度一般较小, 因此可以用较低的计算负荷搜索多普勒模糊数。因此, 该方法在快速运动目标成像中仍然具有较高的计算效率。本文通过假设一个模糊数, 然后利用 2.4 节所提出的方法对目标进行补偿, 来估计多普勒模糊数, 如果补偿后的目标回到其真实位置, 则估计的模糊数正确; 若目标没有回到其真实位置, 则需要继续搜索模糊数。

2.4 距离向速度估计与目标重定位

当估计得到准确的模糊数后, 可得到多普勒中心频率的准确值, 由式(16)及式(18), 可以得到运动目标的距离向速度为:

$$v_y = \frac{c(f_{dco} + M \times f_{PR})}{2f_c \cos(gA)} \quad (19)$$

根据估计出的距离向速度, 构造距离走动补偿函数 H_{RW} , 在距离频域进行补偿, 实现运动目标的重定位。 H_{RW} 为:

$$H_{RW} = \exp \left[j \frac{4\pi}{c} K_r (t_r - 2R_{ref}/c) v_y \cos(gA) + j \frac{4\pi}{c} f_c v_y \cos(gA) \right] \quad (20)$$

2.5 处理流程

根据上文描述, 本方法的详细处理流程如图 3 所示。

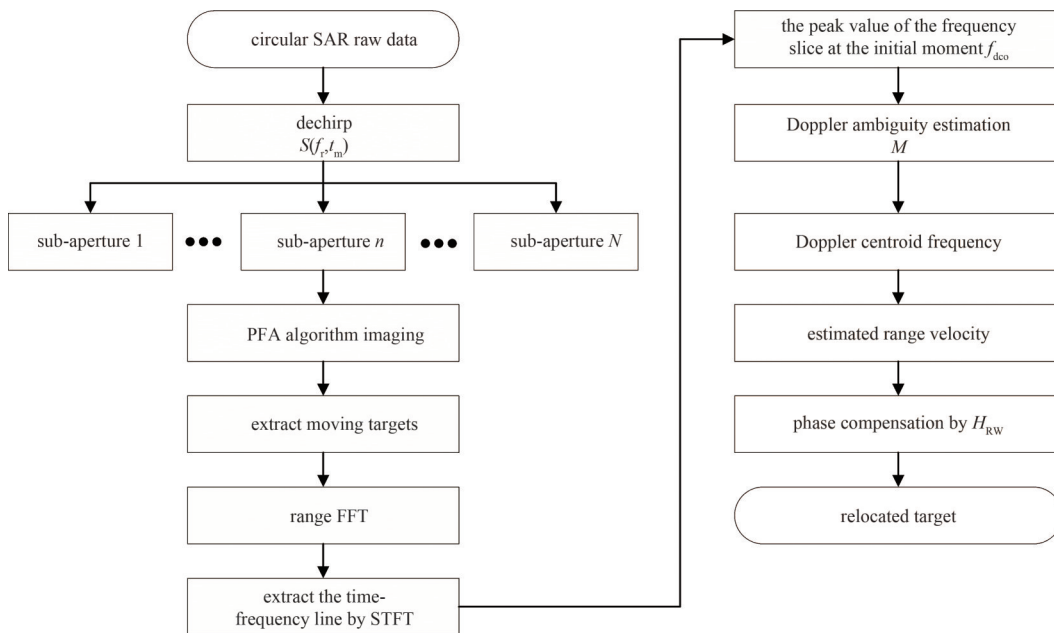


Fig.3 Detailed flowchart of the proposed method

图3 详细流程框图

3 数值实验

3.1 仿真数据实验

表 1 仿真雷达和目标的关键参数

Table 1 Key parameters of simulated radar and target

parameter	value	parameter	value
carrier frequency/GHz	220	image scene radius/m	80
pulse bandwidth/MHz	900	grazing angle/(°)	60
sampling frequency/MHz	25	flight speed of the aircraft/(m·s ⁻¹)	30
pulse repetition frequency/MHz	4 224	target initial position/m	(2, 3)
reference slant range/m	2 000	target range and azimuth velocity/(m·s ⁻¹)	(5, 10)

3.1.1 仿真关键参数设置

该仿真实验采用太赫兹 CSAR 的成像模式，仿真关键参数设置见表 1。雷达与场景中心的距离为 2 000 m，成像场景半径为 80 m，发射信号的中心载频为 220 GHz，擦地角为 60°，雷达载机飞行速度为 30 m/s，动目标在场景中的原始坐标为(2 m, 3 m)，距离向速度为 5 m/s，方位向速度为 10 m/s。

3.1.2 仿真数据多普勒中心频率粗估计

在进行 PFA 算法成像之前，需要对雷达回波数据进行子孔径划分，根据式(12)，计算得到每一个子孔径的角度应为 0.24°，仿真实验设置飞机飞过的角度为 15°，则将孔径划分为 62 个，选择其中一个孔径进行后续处理。划分之后的距离向采样点数和方位向采样点数均为 4 000。

经过 PFA 算法成像后的仿真运动目标数据偏离了其真实位置，并出现散焦现象，如图 4(a)。选取运动目标所在的距离单元，然后在距离频域方位时域对该距离行数据进行 STFT 变换，提取其时频线，如图 4(b)所示，然后根据时频线初始时刻的频率切片的峰值获取多普勒频率的粗估计值为 -448.8 Hz，如图 4(c)所示。

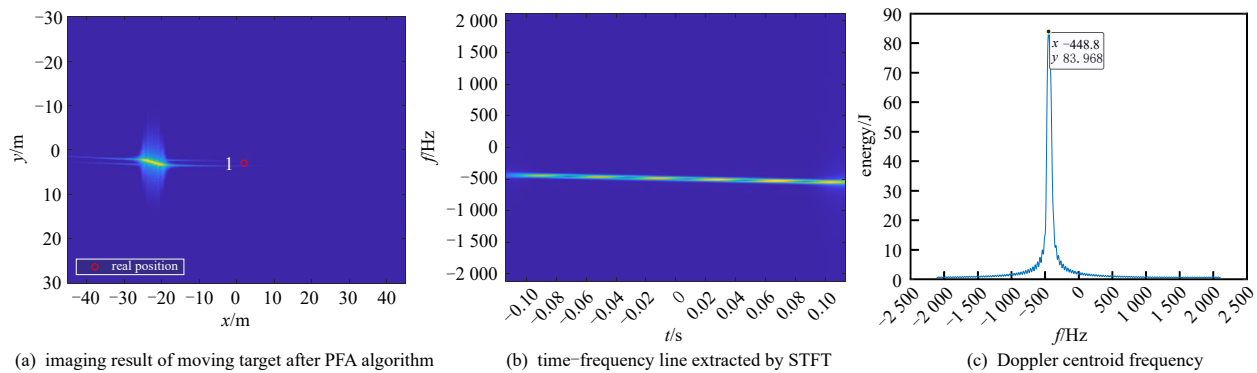


Fig.4 Doppler centroid frequency rough estimation of simulated data

图 4 仿真数据多普勒中心频率粗估计

3.1.3 仿真数据模糊数估计与目标距离向速度估计

由于模糊数为整数，且一般目标的距离向速度较小，因此可以用较小的计算负荷来估计模糊数。当搜索到的模糊数与实际模糊数不匹配时，利用式(20)进行偏移补偿，目标不会回到其真实的位置。如图 5(a)、图 5(c)所示。当模糊数估计正确时，可以使目标回到其真实的位置，如图 5(b)所示，由此实现了目标的重定位。

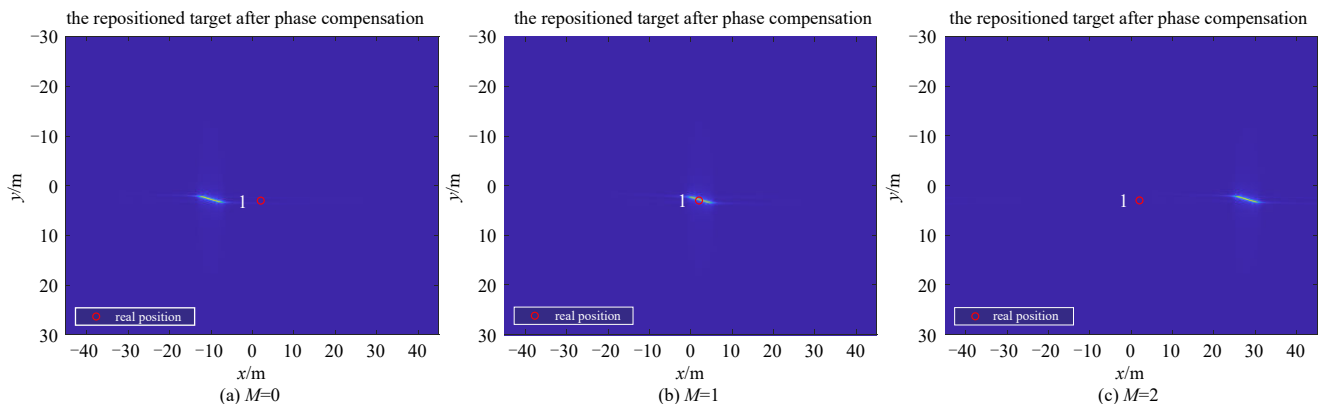


Fig.5 Doppler ambiguity number estimation of a simulated moving target

图 5 仿真数据多普勒模糊数估计

根据估计出的多普勒中心频率和模糊数,可以得到实际的多普勒中心频率,根据式(19),可以估计出目标的距离向速度。仿真数据中,估计得到的 v_y 为5.14 m/s,而真实的 v_y 为5 m/s,相对误差为2.8%,在可接受的范围内。

以上实验没有考虑噪声,为了评估运动参数的估计性能,考虑有噪声情况下的速度估计精确度。如表2所示,对不同信噪比下的运动目标采用本文提出的方法进行距离向速度估计。由表可见,当信噪比较低时,估计精确度有所损失,本方法对信噪比有一定的要求。对于一些淹没在杂波中的弱运动目标来说,估计结果可能不太准确,需要在估计之前进行杂波抑制,但是仍适用于大多数运动目标。

表2 不同SNR下的距离向速度估计精确度

Table2 Accuracy of range velocity estimation under different SNRs

R_{SN}/dB	Doppler centroid frequency/Hz	velocity/(m·s ⁻¹)	relative error/%
-10	-1 074.4	4.29	14.2
0	-70.4	5.66	13.2
5	-426.8	5.18	3.6
10	-444.4	5.15	3.0
20	-448.8	5.14	2.8
30	-448.8	5.14	2.8

3.2 实测数据实验

3.2.1 实测数据关键参数

实测场景中,关键参数见表3,采用太赫兹圆周视频 SAR 成像模式,载机飞行高度为1 000 m,飞行平均速度约为60 m/s,中心频率为220 GHz,信号带宽900 MHz,脉冲重复频率16 000 Hz,擦地角约为20°。

表3 实测雷达和目标的关键参数

Table3 Measured key parameters of radar and target

parameter	value	parameter	value
carrier frequency/GHz	220	flight altitude/m	1 000
pulse bandwidth/MHz	900	grazing angle/(°)	≈20
pulse repetition frequency/Hz	16 000	flight speed of the aircraft/(m·s ⁻¹)	≈60

3.2.2 实测数据多普勒中心频率粗估计

同样地,对实测数据也采取相同的做法,首先对雷达回波数据进行子孔径划分,由式(12),计算得到每一个子孔径的角度为0.24°,总数据角度约300°,则划分的子孔径数为1 250,选取其中一个子孔径数据进行后续处理。划分之后的距离向采样点数为6 000,方位向采样点数为3 072。

经过PFA算法成像后的运动目标成像结果如图6所示,在实测数据中,具有运动目标的场景下,由于雷达发射的信号被目标遮挡,导致部分区域与周围区域相比,在成像结果中较暗,称为阴影,因此,阴影的位置可以反映运动目标的实际位置^[16],可以看到目标在方位向上发生了偏移和散焦。

选取运动目标所在的距离单元,采用STFT变换进行时频线提取,如图7(a)所示,根据时频线初始时刻的频率切片的峰值获取多普勒频率的粗估计值为-947.917 Hz,如图7(b)所示。

3.2.3 实测数据模糊数估计与目标距离向速度估计

同样,根据实际的多普勒中心频率和式(19),可以估计出实测数据运动目标的距离向速度为 $v_y = 0.703$ m/s。实际上,在此场景中,道路方向沿着方位向,道路上的运动目标主要沿着方位向运动,所以距离向速度较小。如图8(a)所示,估计的模糊数为0,利用式(20)对其进行偏移补偿,可以使目标回到其真实的位置。当模糊数不匹配时,补偿后的目标不会回到阴影的位置,如图8(b)所示。经过补偿后,目标与阴影位置重合,验证了该方法的准确性。此外,由于目标的距离向速度较小,因此模糊数的值也较小,对模糊数的搜索过程的时间也较短,因此该方法的效率也较高。

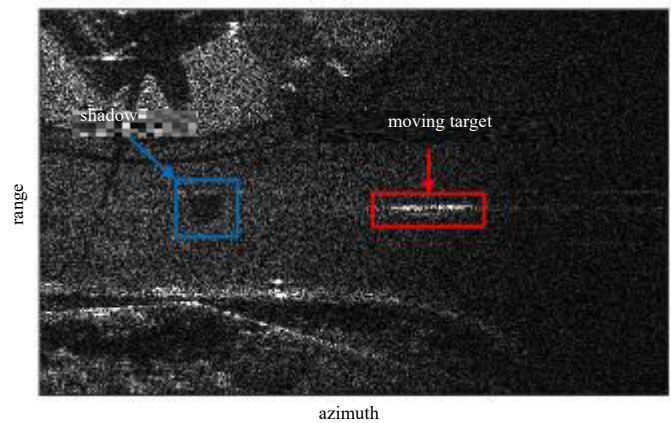


Fig.6 Imaging result of moving target and its shadow after PFA algorithm
图6 PFA算法后运动目标及其阴影成像结果

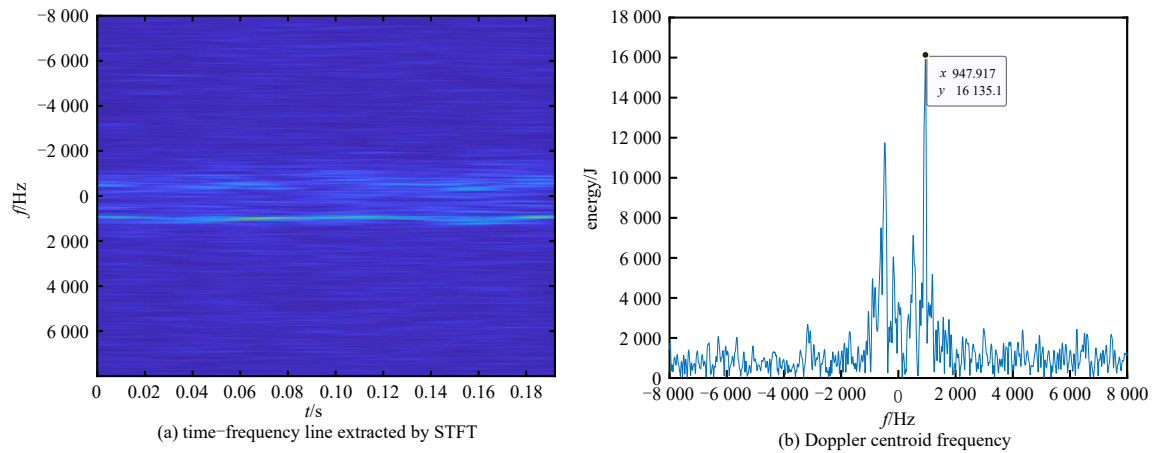


Fig.7 Rough estimation of Doppler centroid frequency for measured data

图7 实测数据多普勒中心频率粗估计

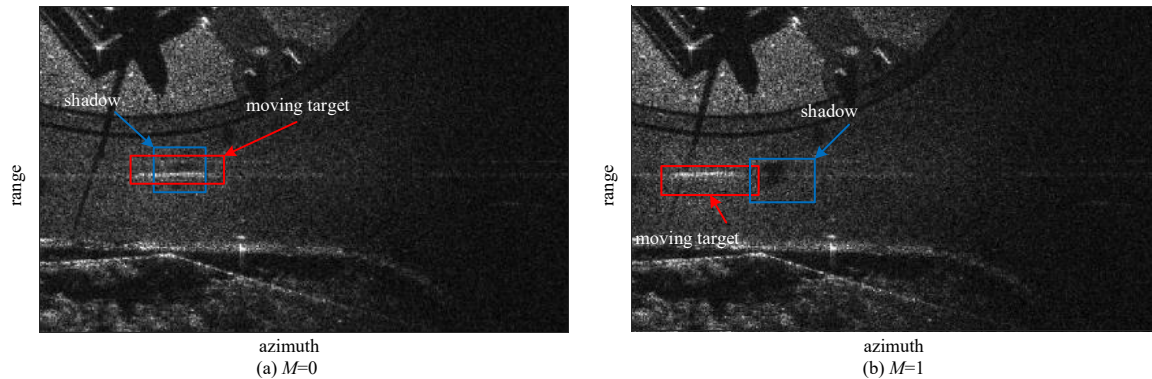


Fig.8 Doppler ambiguity number estimation of measured moving target

图8 实测数据多普勒模糊数估计

4 结论

本文基于子孔径划分的方法，提出了太赫兹 CSAR 的距离向速度估计和重定位的新方法，并利用仿真和实测数据进行了验证。结果表明，由于 CSAR 的复杂运动轨迹，运动目标各参数之间耦合严重，运动目标的偏移不仅与距离向速度有关，也与方位向速度有关。但是通过选择合适的子孔径划分方法，可以实现参数之间的解耦合，运动目标的偏移几乎只与距离向速度有关，因此可以通过多普勒中心频率的估计来完成运动目标的距离向速度估计。并且此方法无需进行长时间的参数穷举搜索过程，大大提高了参数估计过程的效率。经过验证，所估计出来的速度与实际结果误差较小。综上所述，本方法是一种有效、高效的运动目标距离向速度估计方法，这一方法将有助于对运动目标实现重定位和轨迹重构。

参考文献：

- [1] YANG Jian, LIU Chang, WANG Yanfei. Imaging and parameter estimation of fast-moving targets with single-antenna SAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(2): 529-533. doi:10.1109/LGRS.2013.2271691.
- [2] ZHU Shengqi, LIAO Guisheng, QU Yi, et al. A new slant-range velocity ambiguity resolving approach of fast moving targets for SAR system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 48(1): 432-451. doi:10.1109/TGRS.2009.2027698.
- [3] LI Xiaolong, CUI Guolong, YI Wei, et al. Sequence-reversing transform-based coherent integration for high-speed target detection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(3): 1573-1580. doi:10.1109/TAES.2017.2668018.
- [4] 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 Yachao, XING Mengdao, 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.) doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2007.03.033.
- [5] 张绪锦. 多相位中心接收 SAR/GMTI 技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009. (ZHANG Xujin. Study on SAR/GMTI

- technology for multi-phase centre receive system[D]. Nanjing,China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.) doi:10.7666/d.d076082.
- [6] 李相海,杨志伟,贺顺,等. 基于路网信息辅助的多星编队系统 SAR-GMTI 动目标径向速度估计与重定位方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023,45(3):629–637. (LI Xianghai,YANG Zhiwei,HE Shun,et al. Method for SAR-GMTI moving target radial velocity estimation and relocation based on road network information assistance in multi-satellite formation system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023,45(3):629–637.) doi:10.12305/j.issn.1001–506X.2023.03.02.
- [7] 王武. 机载圆周 SAR-GMTI 关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2019. (WANG Wu. Study on key techniques for circular SAR-GMTI[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2019.)
- [8] BAUMGARTNER S V. Circular and polarimetric ISAR imaging of ships using airborne SAR sensors[C]// EUSAR 2018;the 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Aachen,Germany:VDE, 2018:1–6.
- [9] 刘峰,李文亮,李黎. 去调频处理的 SAR 成像方法[J]. 兵工自动化, 2013,32(10):84–87,94. (LIU Feng,LI Wenliang,LI Li. SAR imaging based on stretch processing[J]. Ordnance Industry Automation, 2013,32(10): 84–87, 94.) doi: 10.7690/bgzdh. 2013. 10.023.
- [10] HUANG Penghui,LIAO Guisheng,YANG Zhiwei,et al. A fast SAR imaging method for ground moving target using a Second-Order WVD transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016,54(4):1940–1956. doi:10.1109/TGRS.2015.2490582.
- [11] TELLO M,LÓPEZ-MARTÍNEZ C,MALLORQUI J J. A novel algorithm for ship detection in SAR imagery based on the wavelet transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005,2(2):201–205. doi:10.1109/LGRS.2005.845033.
- [12] DING Yu,XUE Ning,MUNSON D C. An analysis of time-frequency methods in SAR imaging of moving targets[C]// Proceedings of the 2000 IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop.SAM 2000(Cat. No.00EX410). Cambridge,MA, USA:IEEE, 2000:221–225. doi:10.1109/SAM.2000.878002.
- [13] LI Yinwei,WU Qi,JIANG Jiawei,et al. A high-frequency vibration error compensation method for terahertz SAR imaging based on short-time Fourier transform[J]. Applied Sciences, 2021,11(22):10862. doi:10.3390/app112210862.
- [14] YAO Di,WANG Zhou,YANG Wengu,et al. Parameter inversion algorithm of CSAR moving target based on PFA sub-aperture images[J]. The Journal of Engineering, 2019,2019(19):5648–5651. doi:10.1049/joe.2019.0420.
- [15] HUANG Penghui,LIAO Guisheng,YANG Zhiwei,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. doi:10.1109/TGRS.2016.2606437.
- [16] YANG X,SHI Jun,ZHOU Yuanyuan,et al. Ground moving target tracking and refocusing using shadow in video-SAR[J]. Remote Sensing, 2020,12(18):3083. doi:10.3390/12183083.

作者简介:

龙娜(1999–),女,在读硕士研究生,主要研究方向为合成孔径雷达成像.email:longna2024@163.com.

李晋(1981–),男,博士,研究员,主要研究方向为雷达信号处理、太赫兹雷达系统.

邝彩杰(2000–),女,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹 SAR 运动目标成像.

李玉亮(1994–),男,在读博士研究生,主要研究方向为太赫兹雷达高分辨成像.

闵锐(1978–),男,博士,研究员,主要研究方向为太赫兹雷达成像技术、智能传感、雷达信号处理及无线通信等.

皮亦鸣(1968–),男,博士,教授,主要研究方向为雷达信号处理、图像传输与处理和导航定位新技术等.