

文章编号: 2095-4980(2024)06-0627-11

## 太赫兹 CSAR 运动目标参数估计与重聚焦方法

邝彩杰<sup>b</sup>, 李晋<sup>a,b</sup>, 龙娜<sup>b</sup>, 李玉亮<sup>b</sup>, 闵锐<sup>b</sup>, 皮亦鸣<sup>b</sup>

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

**摘要:** 为了提高太赫兹圆周模式下的动目标运动参数估计精确度和成像质量, 提出了一种太赫兹圆周合成孔径雷达(CSAR)运动目标参数估计与重聚焦方法。首先对传统的谱峰测量法进行改进, 并结合动目标阴影位置来估计方位速度。与现有方法相比, 该方法结合了目标的真实位置对多普勒频移的影响, 提高了运动目标方位速度估计值的准确性。利用分数阶傅里叶变换(FrFt)估计方位相位的多普勒调频率, 结合方位速度可得到目标距离速度的估计值。利用估计结果构造一阶和二阶相位补偿函数进行方位相位的补偿, 对于残余的二次及高次相位误差, 利用相位梯度自聚焦算法(PGA)进行补偿。仿真和实测数据中动目标运动参数得到了精确估计, 并实现了良好聚焦, 证明了所提方法的有效性, 大大提高了运动目标的成像质量。

**关键词:** 太赫兹; 圆周合成孔径雷达; 运动参数估计; 动目标重聚焦; 相位补偿

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024073

## Terahertz CSAR ground moving target parameter estimation and refocusing algorithm

KUANG Caijie<sup>b</sup>, LI Jin<sup>a,b</sup>, LONG Na<sup>b</sup>, LI Yuliang<sup>b</sup>, MIN Rui<sup>b</sup>, PI Yiming<sup>b</sup>

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

**Abstract:** In order to improve the accuracy of motion parameter estimation and imaging quality of moving targets in terahertz Circular Synthetic Aperture Radar(CSAR) mode, a terahertz CSAR ground moving target parameter estimation and refocusing method is proposed. Firstly, the traditional spectral peak measurement method is improved to estimate the azimuth velocity by combining the shadow position of the moving target. Compared with the existing methods, the proposed method takes into account the influence of the real position of the target on the Doppler frequency shift, and improves the accuracy of the moving target's azimuth velocity estimation. Then the Fractional Fourier Transform(FrFt) is employed to estimate the Doppler modulation frequency of the azimuth phase, and the range velocity of the target can be estimated together with the azimuth velocity. Finally, the first-order and second-order phase compensation functions are constructed for azimuth compensation based on the estimation results, and the Phase Gradient Autofocus(PGA) algorithm is utilized to compensate for the residual quadratic and higher phase errors. The moving target motion parameters in the simulated and real CSAR data are accurately estimated and good focusing is achieved, which proves the effectiveness of the proposed method and greatly improves the imaging quality of the moving target.

**Keywords:** terahertz; Circular Synthetic Aperture Radar; ground moving target parameter estimation; ground moving target refocusing; phase compensation

太赫兹合成孔径雷达具有带宽大、波长短、分辨力高、抗干扰能力强等优势, 在成像时能更大限度地保留

收稿日期: 2024-01-26; 修回日期: 2024-03-25

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

目标信息,同时也使得慢速运动目标易于“跑出”静止杂波区,易于慢速运动目标的检测和提取,但是同时降低了最大不模糊速度,更容易发生方位多普勒模糊问题。当其工作在圆周模式下时,可以实现对成像场景中运动目标全方位、长时间的实时监测,但是由于圆周合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)载机特殊的曲线运动,运动目标的回波信号中存在复杂的方位距离二维耦合,现有的研究大多是针对低频段条带SAR的,无法直接应用于太赫兹圆周模式,在现代化军事与民事领域中,希望能够长时间监测并识别重点区域的运动目标,并获取更丰富的动目标信息,如重点路段交通流量监控、战场运动装备信息获取、舰船运动速度检测等,因此,如何实现太赫兹圆周SAR模式下的动目标参数估计和重聚焦具有极大的研究意义<sup>[1-5]</sup>。

当成像场景中包含运动目标时,其各运动参数会耦合在回波信号相位中,现有的成像算法都是针对静止目标进行成像的,即利用静止目标的回波特征构造方位压缩函数实现方位向的聚焦,若直接使用此类算法对运动目标成像,由于二者回波相位的区别会导致运动目标方位压缩函数失配,进而发生动目标散焦、偏移等现象。由于运动目标的非合作性,无法事先得知其速度信息,因此需要利用回波信号估计出运动目标的运动参数后,再利用其参数构造精确的补偿函数,实现运动目标的重聚焦,运动目标参数估计是实现运动目标重聚焦必不可少的一环。在圆周模式下,运动目标参数估计主要有2种方法:基于方位相位的频域分析法和基于阴影的阴影检测法。频域分析法主要是通过估计回波方位相位的多普勒信息进行运动参数估计;阴影检测法主要是利用帧与帧之间动目标阴影位置的改变进行参数估计。阴影检测法的一个前提条件是动目标阴影需要足够清晰,而阴影是由于目标在雷达视线方向的能量遮挡产生的,其所在位置反映了目标的真实位置,由文献[6]可知阴影的清晰程度与目标速度信息、雷达平台参数、成像场景的信噪比等诸多因素相关,其中雷达发射信号频率与阴影的清晰程度呈正相关。因此,相较于其他波段的雷达系统,太赫兹SAR的动目标成像结果中含有较为清晰的阴影信息,可利用阴影信息实现动目标参数估计与重定位。然而以上2种方法都存在运动参数估计精确度不高、鲁棒性差的问题<sup>[7-10]</sup>。

基于现有的研究成果和存在的问题,本文提出了一种新的运动目标参数估计方法,首先利用改进的谱峰测量法估计动目标的多普勒中心,由于动目标的原始位置和速度的存在都会导致动目标发生偏移,而在太赫兹波段,成像场景中有丰富的动目标阴影信息<sup>[11]</sup>,阴影的形状和位置就代表了动目标的真实形状和真实位置,因此本文结合动目标阴影位置可实现速度与位置参数的解耦,得到由于方位速度导致的多普勒中心偏移,进而估计出方位速度,并构造一阶补偿函数实现运动目标的重定位。接着,利用分数阶傅里叶变换估计方位相位的多普勒调频率,结合方位速度可得到目标距离速度的估计值,进而构造二阶补偿函数实现运动目标的初步重聚焦。最后,对于残余相位误差利用PGA进行补偿,实现最终的动目标聚焦成像。仿真和实测数据结果验证了本文所提算法的有效性,运动目标成像质量大大提升。

## 1 太赫兹CSAR动目标成像分析

### 1.1 太赫兹CSAR动目标成像模型

太赫兹CSAR动目标成像模型如图1所示,载机在一定的高度 $H$ 上以速度 $V$ 做圆周运动,运动半径记为 $R_c$ ,天线波束始终指向成像场景中心。其中, $\varphi_0$ 是载机到成像场景中心的俯仰角, $x$ 轴是方位向, $y$ 轴是距离向, $\theta$ 是载机当前位置与起始位置的夹角,其表达式为: $\theta = Vt_a/R_c$ ,则任意方位 $t_a$ 时刻载机的坐标可表示为 $(R_c \cos \theta, R_c \sin \theta, H)$ , $P$ 为动目标在方位零时刻的原始位置,记为 $(x_0, y_0, 0)$ ,其速度信息为 $(v_x, v_y)$ ,其中, $v_x$ 是方位向速度,即 $x$ 轴方向上的速度, $v_y$ 是距离向速度,即 $y$ 轴方向上的速度, $\varphi$ 是载机到动目标的俯仰角,则任意方位 $t_a$ 时刻动目标的位置 $P'$ 为 $(x_0 + v_x t_a, y_0 + v_y t_a, 0)$ ,雷达与动目标之间的瞬时斜距 $R(t_a)$ 为:

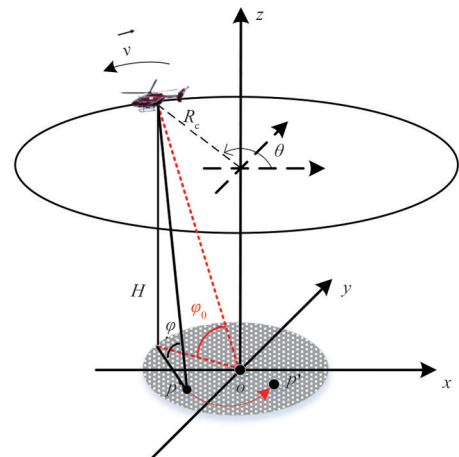


Fig.1 Terahertz circular SAR imaging model  
图1 太赫兹圆周SAR成像模型

$$R(t_a) = \sqrt{(x_0 + v_x t_a - R_c \cos \theta)^2 + (y_0 + v_y t_a - R_c \sin \theta)^2 + H^2} \quad (1)$$

雷达接收回波可表示为:

$$S(\tau, t_a) = w_r\left(\tau - \frac{2R(t_a)}{c}\right) \cdot \exp\left\{j\pi K_r\left(\tau - \frac{2R(t_a)}{c}\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c} f_c R(t_a)\right\} \quad (2)$$

式中： $w_r\left(\tau - \frac{2R(t_a)}{c}\right)$  为距离包络； $\tau$  为距离快时间； $c$  为光速； $K_r$  为发射线性调频信号的调频率； $f_c$  为发射信号的中心频率，将其与参考函数相乘，得到去斜后的回波信号为：

$$S_{\text{dechirp}}(\tau, t_a) = w_r\left(\tau - \frac{2R(t_a)}{c}\right) \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c} K_r\left(\tau - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) R_\Delta\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c} f_c R_\Delta\right\} \cdot \exp\left\{j\frac{4\pi}{c^2} K_r R_\Delta^2\right\} \quad (3)$$

$R_{\text{ref}}$  是参考距离，通常选取载机到成像场景中心的距离作为参考距离，即  $R_{\text{ref}} = \sqrt{R_c^2 + H^2}$ ， $R_\Delta$  是瞬时斜距与参考距离之差，即  $R_\Delta = R(t_a) - R_{\text{ref}}$ ，第 1 个指数项是距离相位，第 2 个指数项是方位相位，第 3 个指数项是视频残余相位，在后续处理时需要去除。在距离向进行傅里叶变换，完成距离压缩同时去除视频残余相位，得到处理后的回波信号为：

$$S_{\text{mf}}(f_r, t_a) = T_p \sin c\left(T_p\left(f_r + \frac{2K_r R_\Delta}{c}\right)\right) \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c} f_c R_\Delta\right\} \quad (4)$$

式中： $f_r$  为距离频率； $T_p$  为距离脉冲宽度。从式(4)可以看出，接收回波中存在距离徙动现象，由文献[12]知在太赫兹频段下距离徙动现象不再是影响动目标成像质量的主要因素，前期无需对距离徙动进行处理，可以在后续进行方位相位补偿时一起进行补偿。

### 1.2 载机运动轨迹拟合

从式(1)可以看出，若直接利用全孔径回波信号进行参数估计，则载机的曲线运动特性，导致回波信号形式非常复杂，并且存在严重的方位距离耦合。基于此，本文采用子孔径划分的方法对子孔径回波数据进行研究，并利用泰勒定理对载机运动轨迹进行拟合，在每个子孔径下，由于方位观测时间较短，可大大降低方位距离上的二维耦合。子孔径划分模型如图 2 所示， $T_{\text{sub}}$  为一个子孔径合成时间， $\theta_n$  为第  $n$  个孔径的方位中心角， $t_a^n$  代表第  $n$  个子孔径的方位中心时刻。

以第  $n$  个子孔径为例，得到动目标与载机的瞬时斜距  $R_n(t_a)$  为：

$$R_n(t_a) = \sqrt{\left(x_n(t_a) - x_{p,n}(t_a)\right)^2 + \left(y_n(t_a) - y_{p,n}(t_a)\right)^2 + H^2} \quad (5)$$

式中： $(x_n(t_a), y_n(t_a))$  为第  $n$  个子孔径下目标的方位和距离位置； $(x_{p,n}(t_a), y_{p,n}(t_a))$  分别为第  $n$  个子孔径下雷达的方位和距离位置，对雷达的坐标利用泰勒定理在其方位中心时刻进行二阶展开，可得其表达式分别为：

$$\begin{cases} x_n(t_a) = x_0 + v_x(t_a - t_a^n) \\ y_n(t_a) = y_0 + v_y(t_a - t_a^n) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_{p,n}(t_a) \approx R_c \cos \theta_n - V \sin \theta_n (t_a - t_a^n) - \frac{V^2}{2R_c} \cos \theta_n (t_a - t_a^n)^2 \\ y_{p,n}(t_a) \approx R_c \sin \theta_n + V \cos \theta_n (t_a - t_a^n) - \frac{V^2}{2R_c} \sin \theta_n (t_a - t_a^n)^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $(x_0, y_0)$  代表该子孔径下动目标的原始位置，为便于分析，不妨选取方位中心角为 0 的子孔径进行研究，即  $\theta_n = 0$ ，并记  $t_n = t_a - t_a^n$ ，其范围满足  $t_n \in \left[-\frac{T_{\text{sub}}}{2}, \frac{T_{\text{sub}}}{2}\right]$ ，则雷达的坐标可表示为  $\left(R_c - \frac{V^2}{2R_c} t_n^2, V t_n\right)$ ，将其代入斜距方程  $R_n(t_a)$  进行泰勒展开可得：

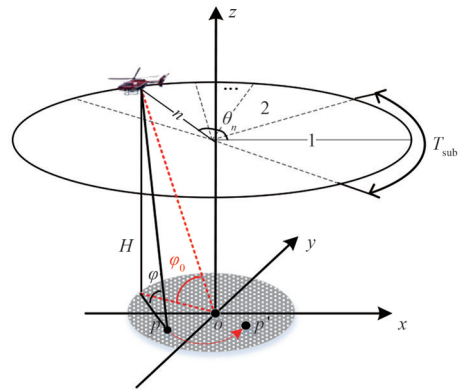


Fig.2 Sub-aperture imaging model  
图2 子孔径成像模型

$$R_n(t_n) \approx R_n(0) + R_{n_1}(0)t_n + \frac{1}{2}R_{n_2}(0)t_n^2 + \frac{1}{6}R_{n_3}(0)t_n^3 + \dots \quad (8)$$

式中： $R_n(0)$ 为相位常数项，对成像质量无影响； $R_{n_1}(0)$ 为一阶相位项，会导致成像的偏移，决定了方位多普勒中心； $R_{n_2}(0)$ 为二阶相位项，决定了方位多普勒调频率； $R_{n_3}(0)$ 为三阶相位项，会导致方位旁瓣不对称，在本文中主要对一阶和二阶相位进行分析，进行运动目标参数的估计，其表达式分别如下：

$$\begin{cases} R_n(0) = (R_c - x_0)^2 + y_0^2 + H^2 \\ R_{n_1}(0) = \frac{1}{R_n(0)} [y_0(v_y - V) - (R_c - x_0)v_x] \approx -\frac{y_0V}{R_n(0)} - v_x \sin \phi_0 \\ R_{n_2}(0) = \frac{1}{R_n(0)} [(V - v_y)^2 - V^2 + v_x^2] \end{cases} \quad (9)$$

对方位相位进行一阶和二阶求导可得方位多普勒中心 $f_{dc}$ 和多普勒调频率 $K_a$ 表达式分别如下：

$$\begin{cases} f_{dc} \approx -\frac{2v_x}{\lambda} \sin \phi_0 - \frac{2y_0V}{\lambda R_n(0)} \\ K_a = \frac{2}{\lambda R_n(0)} ((V - v_y)^2 - V^2 + v_x^2) \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知多普勒中心频率由方位速度和目标原始距离位置共同决定，由于太赫兹 CSAR 成像场景中有丰富的动目标阴影信息，而阴影位置即为动目标的真实位置，因此可以通过检测动目标阴影位置消除目标原始位置对多普勒中心的影响，从而估计出方位速度，故后续在分析时忽略该项的影响；多普勒调频率由距离、方位向速度共同决定，可结合多普勒中心的估计结果对距离速度进行估计。

### 1.3 运动目标参数估计与重聚焦

本文所提太赫兹 CSAR 运动目标参数估计与重聚焦算法的详细流程如图 3 所示，下面对该流程图的步骤进行详细阐述。

#### 1.3.1 运动目标方位速度估计与重定位

由上一小节的分析可知运动目标的方位速度可通过估计其多普勒中心频率并结合动目标阴影位置得出，现存的多普勒中心估计方法主要有时频分析方法如短时傅里叶变换、分数阶傅里叶变换等，频域估计法如谱峰测量法、杂波锁定法、能量均衡法等<sup>[13-14]</sup>。频域估计法都是用于估计静止场景的多普勒中心频率，无法直接应用于运动目标，需要做一定的改进，基于此，本文提出了一种改进的谱峰测量法来估计动目标的多普勒中心频率，其原理为方位向回波的某个多普勒频率上的能量必然来自雷达波束中某个特定方向上的目标，而多普勒质心的值对应于雷达波束的中心照射在动目标时的位置，SAR 回波信号的方位功率谱受到天线方位向方向图的调制，由于方位图的峰值为天线指向中心，因此功率谱峰值的位置就是多普勒中心频率的位置，以此来进行多普勒中心的估计。该方法依赖于成像场景的均匀性，均匀性越高，多普勒质心的估计精确度越高。为了提高多普勒质心的估计精确度，改进的谱峰测量法流程如下：

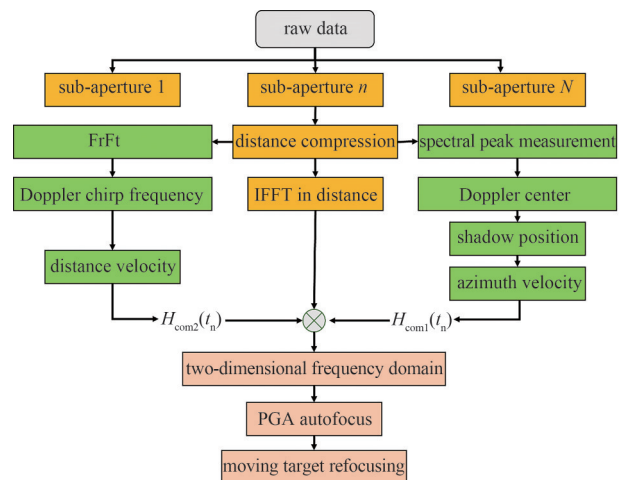


Fig.3 Flow chart of the proposed algorithm  
图3 算法流程图

第1步：对经过距离压缩并去除视频残余相位后的回波信号，即式(4)进行方位傅里叶变换，变换到图像域，此时可得到未聚焦的动目标成像结果；

第2步：提取杂波谱外的动目标所在的距离单元进行研究，为提高多普勒质心的估计精确度，可对多个距离单元的动目标回波方位包络进行求和，得到动目标回波的方位向频谱：

$$S(f_a) = \sum_{f_r} |S(f_r, f_a)| \quad (11)$$



式中  $f_a$  为方位向频率，方位频谱的峰值即为多普勒质心的估计结果。

第 3 步：由于太赫兹波波长较短，由式(10)中动目标多普勒中心的表达式可知即使很小的方位向速度都会导致多普勒中心发生模糊<sup>[15]</sup>，即多普勒质心的真实值超过方位采样频率的一半。以 220 GHz 雷达体系为例，假设发射脉冲的中心频率为  $f_c = 2.5 \times 10^{11}$  Hz，则波长为  $\lambda = \frac{c}{f_c} = 0.0012$  m，设方位采样频率  $f_{PR} = 8\ 000$  Hz，载机到成像场景中心的俯仰角  $\varphi_0 = \frac{\pi}{3}$ ，忽略动目标原始位置的影响，则其最大不模糊速度  $v_x = \frac{f_{PR} \lambda}{4 \sin \varphi_0} \approx 2.771$  m/s，当动目标的真实方位速度超过该值，就会发生多普勒频谱模糊现象，此时多普勒质心  $f_{dc}$  的真值表达式如下：

$$f_{dc} = \widehat{f}_{dc} + N f_{PR} \quad (12)$$

式中： $\widehat{f}_{dc}$  为利用谱峰估计法得到的多普勒质心估计值； $N$  为多普勒模糊数。

第 4 步：根据回波图像中动目标阴影所处位置的多普勒频率  $f_{dc1}$  得到由动目标引起的多普勒频移  $f_{dc2}$  为：

$$f_{dc2} = f_{dc} - f_{dc1} = -\frac{2v_x}{\lambda} \sin \varphi_0 \quad (13)$$

进而可估计出动目标的方位速度。

第 5 步：利用估计出的方位速度可构造一阶补偿函数如下：

$$H_{com1}(t_n) = \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} \left[ f_c + K_r \left( \tau - \frac{2R_{ref}}{c} \right) \right] \cdot v_x \sin \varphi_0 t_n \right\} \quad (14)$$

将其与去斜后的回波信号式(3)相乘，可同时校正多普勒偏移和距离走动，得到校正后的回波信号为：

$$S_{com1}(\tau, t_a) = w_r \left( \tau - \frac{2R(t_a)}{c} \right) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} \left[ K_r \left( \tau - \frac{2R_{ref}}{c} \right) + f_c \right] \left( R_n(0) + \frac{1}{2} R_{n_2}(0) t_n^2 + \frac{1}{6} R_{n_3}(0) t_n^3 - R_{ref} \right) \right\} \quad (15)$$

将式(15)进行二维傅里叶变换，变换到图像域，若未发生多普勒模糊，此时动目标应与其阴影重合，因此可根据校正后的动目标位置对模糊数进行估计，由于多普勒模糊数都为整数，所以估计的复杂度并不高，从而得到真实的方位速度估计结果。

### 1.3.2 运动目标距离速度估计与重聚焦

由式(10)中动目标多普勒调频率的表达式可知其由动目标的方位、距离速度共同决定，可通过估计多普勒调频率估计其距离速度。在进行距离压缩后，方位回波可认为是一个 chirp 信号，因此可用时频分析法—分数阶傅里叶变换来估计多普勒调频率，与其他时频分析方法相比，该方法不存在交叉项，且调频率是一个确定的数值，无需借助其他直线检测方法如霍夫变换来估计调频率。其基本原理为，对距离压缩后的方位时域信号进行旋转角度为  $\alpha$  的分数阶傅里叶变换，得：

$$F^\alpha S(f_r, \mu) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f_r, t) K_\alpha(t, \mu) dt = A \sqrt{1 - j \cot \alpha} \exp(j\pi\mu^2 \cot \alpha + j\varphi_0) \int_{-T_r/2}^{T_r/2} \exp[j\pi(K_\alpha + \cot \alpha)t^2 + j2\pi(f - \mu \csc \alpha)t] dt \quad (16)$$

当旋转角度  $\alpha$  合适时，方位信号的能量会有明显聚焦，能量绝大部分集中在  $\mu$  域上以  $\mu$  为中心的一个窄带内；而在其他旋转角度下，信号能量聚焦不明显，因此可对变换后的信号进行峰值点的二维搜索即可估计其调频率。调频率和峰值坐标  $(\alpha, \mu)$  的关系如下：

$$K_\alpha = -\frac{f_{PR}^2}{N_a} \cot \alpha \quad (17)$$

式中  $N_a$  是方位向信号的采样点数。根据调频率的估计结果可估计出距离速度，并构造二阶补偿函数：

$$H_{com2}(t_n) = \exp \left\{ j \frac{2\pi}{c} \left[ f_c + K_r \left( \tau - \frac{2R_{ref}}{c} \right) \right] \cdot \frac{1}{R_n(0)} [(V - v_y)^2 - V^2 + v_x^2] t_n^2 \right\} \quad (18)$$

将式(18)与式(15)相乘，同时校正距离弯曲和二阶方位相位误差，得到校正后的回波信号为：

$$S_{com2}(\tau, t_a) = w_r \left( \tau - \frac{2R(t_a)}{c} \right) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} \left[ K_r \left( \tau - \frac{2R_{ref}}{c} \right) + f_c \right] \left( R_n(0) + \frac{1}{6} R_{n_3}(0) t_n^3 - R_{ref} \right) \right\} \quad (19)$$

将式(19)进行二维逆傅里叶变换, 得到初步聚焦后的动目标回波信号:

$$S_{mf}(f_r, f_a) = T_p \sin c \left[ T_p \left( f_r + \frac{2K_r(R_n(0) - R_{ref})}{c} \right) \right] \cdot \sin c [T_{sub} f_a] \cdot \exp \left\{ j \frac{2\pi}{3c} f_c R_{n_s}(0) f_a^3 \right\} \quad (20)$$

可以看到经过二阶补偿后的回波信号中仍然存在高阶相位误差, 在真实场景中载机在飞行过程中可能还存在运动误差, 本文利用 PGA 算法<sup>[16]</sup>对此部分相位进行补偿, 得到动目标的聚焦成像结果。下面利用仿真数据及实测数据结果验证本算法的有效性。

## 2 算法验证

### 2.1 仿真数据结果

为验证本算法的有效性, 本文利用太赫兹圆周 SAR 面运动目标的回波数据进行仿真, 仿真参数设置见表 1。

当动目标静止时, 利用 PFA(Polar Format Algorithm)算法对其成像的结果如图 4 所示, 其中横坐标  $x$  代表方位向距离,  $y$  代表距离向距离(图 5 中  $x$  和  $y$  代表含义和图 4 相同), 可以看到图 4 中动目标与其阴影重合, 未发生偏移和散焦现象, 与理论分析相符。

表 1 仿真参数设置  
Table 1 Simulation parameters setting

simulation parameter	value
terahertz center frequency/GHz	220
operation mode	circle mode
PRF/Hz	3 000
platform speed/(m·s <sup>-1</sup> )	120
pitch angle/(°)	45
sub-aperture time/s	0.2
target original location	(0,0)
reference distance/m	8 000

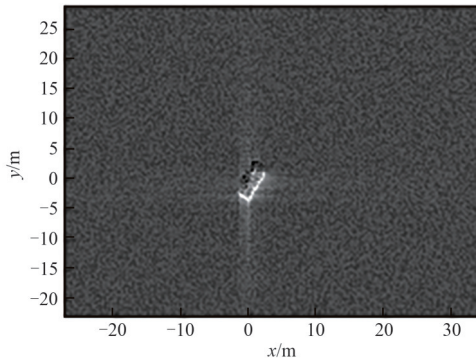


Fig.4 Imaging results of moving target with zero velocity  
图 4 动目标速度为零时的成像结果

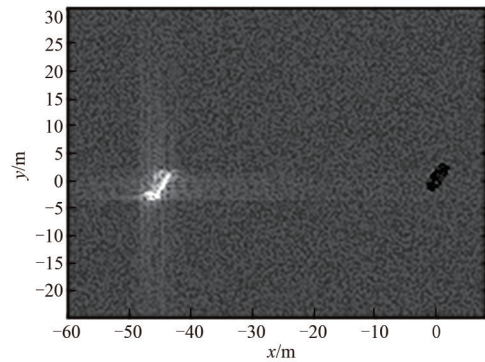


Fig.5 Imaging results of moving target with velocity (4 m/s,6 m/s)  
图 5 动目标速度为(4 m/s,6 m/s)时的成像结果

当动目标的速度设置为(4 m/s,6 m/s)时, 直接利用 PFA 算法进行成像的结果如图 5 所示, 可以看到动目标发生了严重的偏移和散焦。利用谱峰测量法得到其多普勒中心的估计结果如图 6 所示, 其中横轴代表频率, 纵轴代表在该频率处的回波能量, 可以看到峰值对应的频率  $\hat{f}_{dc}$  为 -1 120 Hz, 由上述分析可知, 还需根据动目标阴影所在位置估计目标本身距离位置带来的多普勒频移, 利用文献[6]中所述的动目标阴影检测方法提取到的动目标阴影如图 7 所示, 结合动目标的阴影形状特征进一步得到阴影中心坐标的估计结果如图 8 所示, 方位零时刻的动目标原始坐标为(0.541 m,0.699 m), 根据式(10)得到其方位速度估计值为 1.087 m/s, 根据该估计值构造一阶补偿函数式(14)与回波数据相乘后, 得到

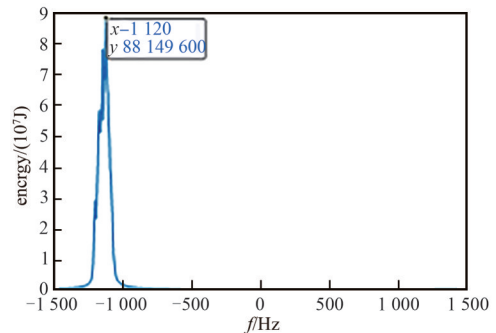


Fig.6 Results of Doppler center estimation  
图 6 多普勒中心估计结果

动目标的成像结果如图 9 所示。

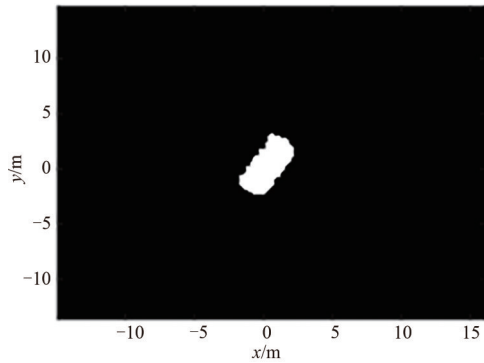


Fig.7 Shadow detection results for moving target  
图 7 目标阴影检测结果

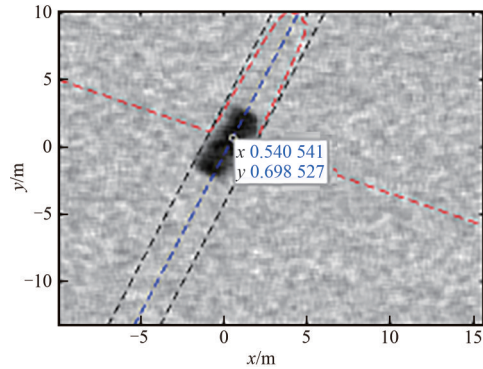


Fig.8 Original coordinate estimation of moving target  
图 8 目标原始坐标估计

此时动目标并未与其阴影重合，这是由于发生了多普勒模糊导致的，真实的多普勒中心  $f_{dc}$  应为  $f_{dc} = \hat{f}_{dc} + Nf_{PR}$ ，根据图 9 补偿的结果可知  $N$  应为一个正整数，从 1 开始遍历搜索直至动目标的一阶补偿结果与其阴影重合，即可得到多普勒模糊数的估计结果，从而得到目标的真实方位速度。在本仿真实验中，根据动目标重定位结果得到多普勒模糊数为 1，进而得到方位速度的估计值  $v_x \approx 4.064$  m/s，与真实值非常接近，此时一阶补偿后的动目标成像结果如图 10 所示，可以看到动目标与其阴影完全重合，验证了方位速度估计的准确性。图 11 是利用分数阶傅里叶变换得到的多普勒调频率估计结果，由于在同一距离单元存在多个散射点，每个方位信号都相当于多个 LFM 信号的叠加，经 FrFt 后会出现多个峰值，为了提高参数估计精确度并改善方位相位的补偿效果，这里取 3 个峰值横坐标的平均值作为最终的变换阶数，根据式(17)可得到多普勒调频率的估计结果为  $K_a \approx 306.348$  Hz/s，从而得到距离速度的估计值  $v_y \approx 6.095$  m/s，误差非常小。

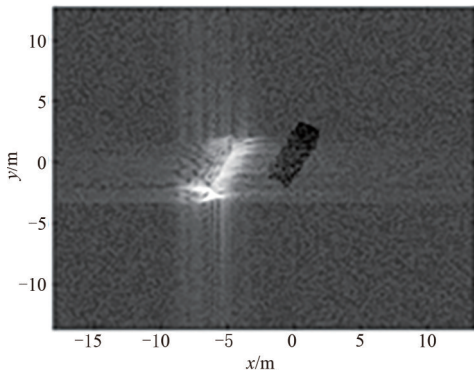


Fig.9 Imaging results of moving target after first order compensation (Doppler ambiguity)  
图 9 一阶补偿后的动目标成像结果(多普勒模糊)

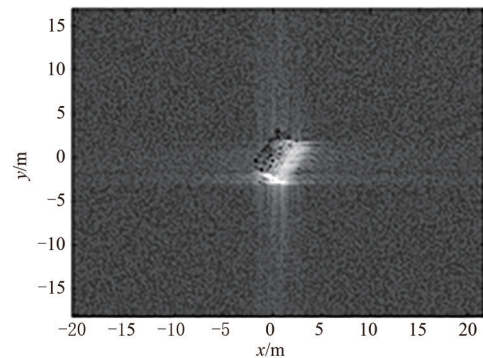


Fig.10 Imaging results of moving target after first order compensation (after Doppler ambiguity correction)  
图 10 一阶补偿后的动目标成像结果(多普勒模糊校正后)

根据估计值构造二阶补偿函数式(18)，并与一阶补偿后的回波信号相乘，得到动目标的重聚焦效果如图 12 所示。可以看到动目标聚焦效果良好，无需利用 PGA 补偿高阶相位误差，这是由于仿真环境比较理想，载机无运动误差且动目标无杂波干扰，三阶及以上误差无需补偿即可实现良好的动目标聚焦效果。

为了验证所提算法能够有效提高方位速度估计值的准确度，做了以下对比实验，仿真中设置了 3 个方位速度相同、原始坐标不同的动目标，动目标参数设置及传统算法和本文算法对方位速度的估计结果如表 2 所示，传统算法认为动目标原始坐标对多普勒频移的影响可以忽略，但是在太赫兹频段，发射信号波长较短，由式(10)多普勒中心的表达式可知原始坐标对方位速度估计精确度有较大影响，并且该影响应当随着目标原始位置与成像坐标系原点的偏离程度而增大。仿真结

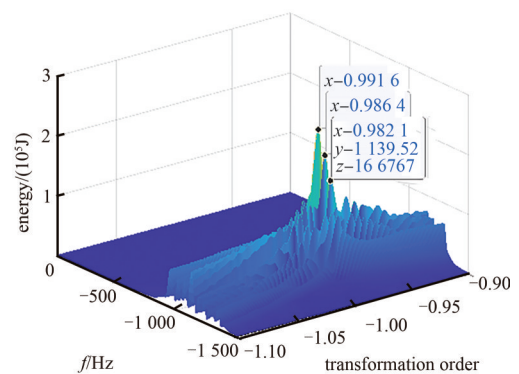


Fig.11 After FrFt  
图 11 分数阶傅里叶变换后



果显示当动目标的原始坐标为(0,0)时,即阴影位置和原点重合时,传统方法和本文算法方位速度估计结果相差不大,当动目标的原始坐标为(10,10)时,阴影位置偏离原点,相较传统算法,本文算法对方位速度估计结果的相对精确度提高了1.7%;当动目标的原始坐标为(20,20)时,阴影偏离原点的程度进一步增大,本文算法对方位速度估计结果的相对精确度提高了7%,与理论分析吻合,因此考虑阴影位置对方位速度的影响可以提高方位速度估计的精确度。

## 2.2 实测数据结果

该算法在仿真数据中取得了良好的速度参数估计效果,并大大提升了动目标的成像质量,在太赫兹 CSAR 实测回波数据上对本算法进行验证,实测数据的参数设置见表3。

表2 动目标方位速度估计结果对比

Table2 Comparison of azimuth velocity estimation results of moving targets

No. of target	target coordinate/m	target azimuth velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	estimated azimuth velocity of traditional algorithm/(m·s <sup>-1</sup> )	estimated azimuth velocity of the proposed algorithm/(m·s <sup>-1</sup> )
1	(0,0)	4	4.078	4.064
2	(10,10)	4	3.890	4.042
3	(20,20)	4	3.648	4.072

表3 实测数据参数设置

Table3 Parameters setting in real measurement

parameter	value
terahertz center frequency/GHz	220
operation mode	circle mode
PRF/Hz	16 000
platform speed/(m·s <sup>-1</sup> )	64
pitch angle/(°)	0.355 3
sub-aperture time/s	0.2
reference distance/m	3 000

实测数据的成像结果如图13所示,可以看到场景中有大量的动目标及其阴影,并且动目标在方位向发生了严重的偏移和散焦,提取杂波谱外的3个动目标进行研究,利用PFA算法得到其原始成像结果如图14(a)、(b)、(c)所示,其中横坐标代表方位向采样单元,纵坐标代表距离向采样单元,可以看到动目标图14(a)的散焦尤为严重,跨越了将近100个方位采样单元,通过本文所提多普勒参数估计方法得到这3个动目标的速度参数的估计结果见表4,利用估计的速度参数构造一阶和二阶相位补偿函数,并结合PGA算法进行重聚焦的结果如图14(d)、(e)、(f),可以看到动目标的成像质量大大提升,3个动目标均得到了良好的聚焦,动目标图14(a)、图14(c)的聚焦效果最为显著。目前用于动目标自聚焦成像的算法大多是基于动目标参数估计的,未考虑载机运动误差的影响,在太赫兹频段,尤其是CSAR模式下,成像结果对运动误差非常敏感,因此传统动目标自聚焦成像算法在太赫兹频段聚焦效果并不理想。图15给出了利用文献[9]中提出的基于参数估计的CSAR动目标成像算法在实测数据上的成像效果,可以看出相比传统算法,本文所提算法大大提升了动目标的成像质量。

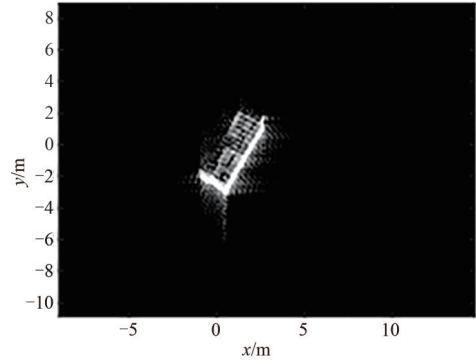


Fig.12 Moving target refocused imaging  
图12 动目标重聚焦成像

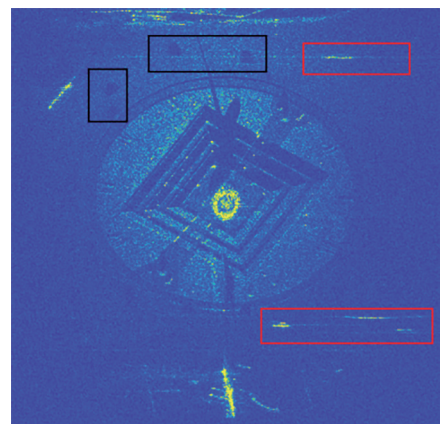


Fig.13 Imaging results of the THz CSAR real data by PFA algorithm

图13 实测太赫兹CSAR数据利用PFA算法成像结果



表4 动目标速度估计结果  
Table4 Velocity estimation of moving target

No. of target	velocity value/(m·s <sup>-1</sup> )
1	(0.702,3.534)
2	(4.207,1.361)
3	(4.488,2.143)

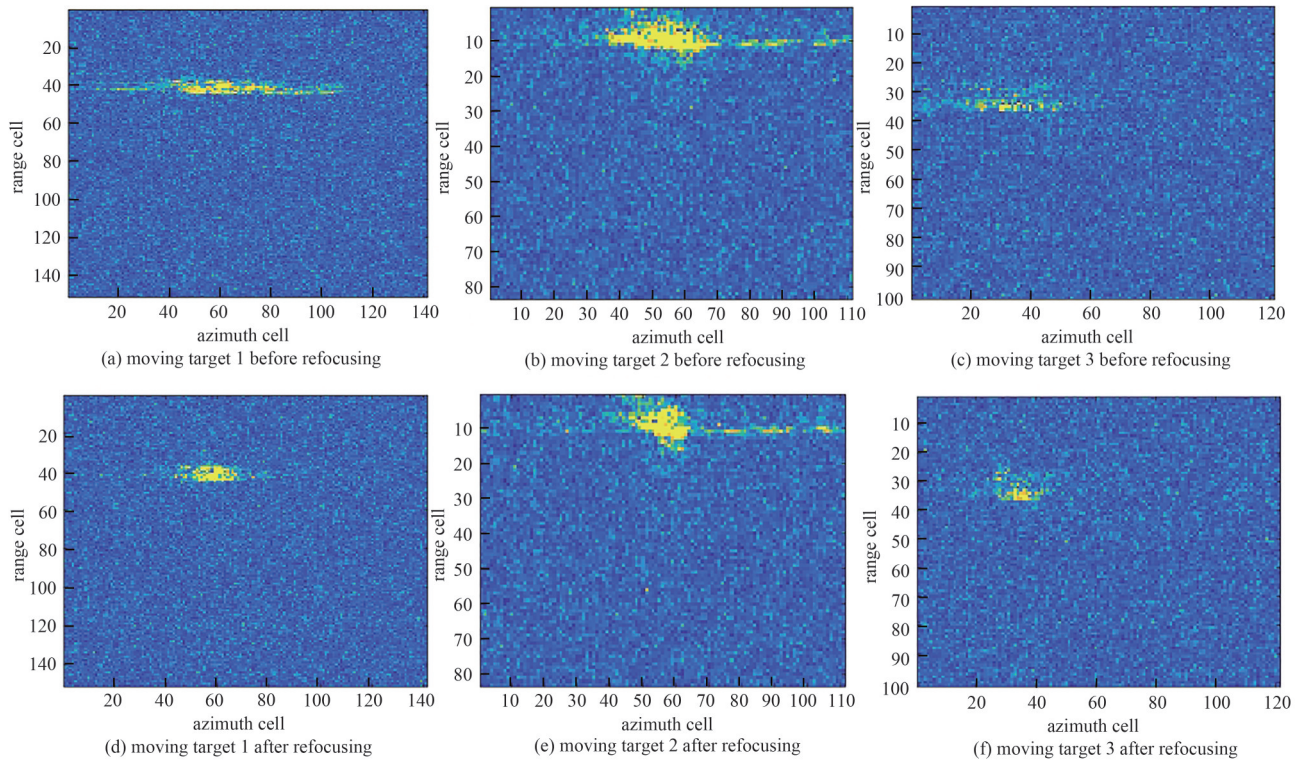


Fig.14 Moving targets refocused results by the proposed algorithm  
图 14 利用本文算法得到的动目标重聚焦成像结果

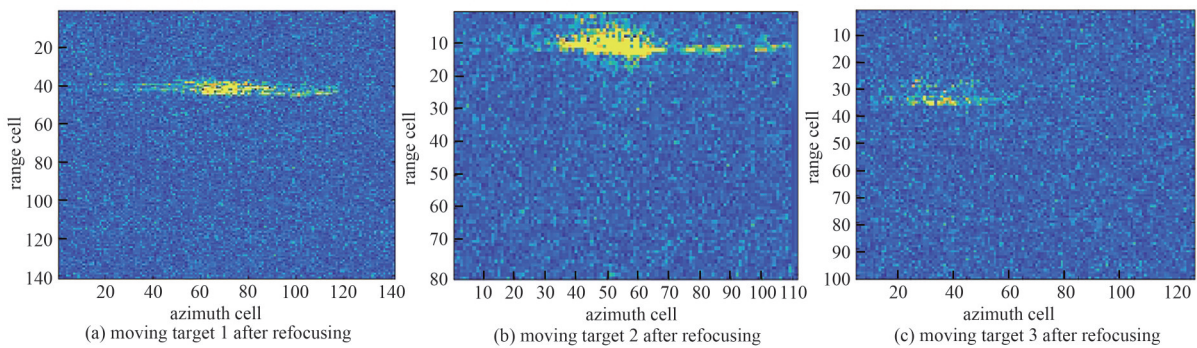


Fig.15 CSAR moving target imaging algorithm based on parameter estimation  
图 15 基于参数估计的CSAR 动目标成像算法

从动目标图像熵值和对比度的角度分析其重聚焦效果，图像熵与对比度的计算见式(21)~式(22)。

$$C = \frac{\sqrt{E(|I(m,n)|^2 - E(|I(m,n)|^2))^2}}{E(|I(m,n)|^2)} \tag{21}$$

$$HH = - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left( \frac{|I(m,n)|^2}{E_n} \cdot \log_2 \frac{|I(m,n)|^2}{E_n} \right) \tag{22}$$

式中:  $C$  为图像  $I$  的对比度;  $|I(m, n)|^2$  为图像在像素点  $m$ 、 $n$  处的强度;  $HH$  为图像熵值, 其中  $E_n$  如式(23)所示:

$$E_n = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |I(m, n)|^2 \quad (23)$$

从式(21)~式(23)可以看出动目标的聚焦程度与熵值呈负相关, 与对比度呈正相关, 即熵值越低, 聚焦程度越好, 对比度越低, 聚焦程度越差, 重聚焦前后的熵值和对比度对比分别见表 5、表 6。重聚焦后的动目标熵值均有不同程度的降低, 对比度均有不同程度的提升, 进一步验证了本文所提算法的有效性。

表 5 动目标重聚焦前后熵值对比

Table 5 Entropy value comparison of moving targets before and after refocusing

No. of target	entropy value before refocusing	entropy value after refocusing
1	8.214 9	7.936 3
2	6.543 7	5.999 4
3	8.162 8	7.984 6

表 6 动目标重聚焦前后对比度对比

Table 6 Contrast comparison of moving targets before and after refocusing

No. of target	contrast before refocusing( $\times 10^4$ )	contrast after refocusing( $\times 10^4$ )
1	4.830 5	6.112 3
2	16.712 0	20.805 0
3	2.492 5	2.791 4

### 3 结论

本文利用改进的谱峰测量法估计出了运动目标回波信号的多普勒中心频率, 结合动目标的阴影位置估计出了方位速度, 提高了方位速度估计值的准确性, 接着利用分数阶傅里叶变换估计方位回波信号的多普勒调频率, 根据多普勒调频率和距离速度的关系得到了距离速度的估计值, 最后利用参数估计结果构造相位补偿函数与回波信号相乘, 得到初步聚焦的动目标成像结果。在实际场景中, 考虑到载机的运动误差和杂波的影响, 对于剩余的高次相位误差利用 PGA 算法进行补偿, 得到最终的动目标重聚焦成像结果。仿真和实测数据验证了本算法的有效性, 大大提升了动目标的成像质量。

#### 参考文献:

- [1] YAO Gang, PI Yiming. Terahertz active imaging radar: preprocessing and experiment results[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014, 10(2014):2-8. doi:10.1186/1687-1499-2014-10.
- [2] YANG Xu, PI Yiming, LIU Tong, et al. Three-dimensional imaging of space debris with space-based terahertz radar[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3):1063-1072. doi:10.1109/JSEN.2017.2783367.
- [3] LABS S. A video of video SAR imaging[EB/OL]. [2024-01-26]. <https://www.sandia.gov/radar/video/index>.
- [4] KIM S H, FAN R, DOMINSKI F. ViSAR: a 235 GHz radar for airborne applications[C]// 2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18). Oklahoma City, OK, USA: IEEE, 2018:1549-1554. doi:10.1109/RADAR.2018.8378797.
- [5] FAN Lei, WANG Hongqiang, YANG Qi, et al. High frame-rate and low-latency video SAR based on robust Doppler parameters estimation in the terahertz regime[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023(61):1-16. doi:10.1109/TGRS.2023.3271310.
- [6] 左峰. 视频合成孔径雷达成像算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2020. (ZUO Feng. Research on video synthetic aperture radar imaging algorithm[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.)
- [7] LI Jianpeng, AN Daoxiang, WANG Wu, et al. A novel method for single-channel CSAR ground moving target imaging[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(19):8642-8649. doi:10.1109/JSEN.2019.2912863.
- [8] SHANG Shize, LIU Zhenhua, WU Fuwei, et al. Ground moving targets velocity estimation based on shadow and target detection[C]// 2021 CIE International Conference on Radar(Radar). Haikou, Hainan, China: IEEE, 2021:661-664. doi:10.1109/Radar53847.2021.10028412.
- [9] 王武. 机载圆周 SAR-GMTI 关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2022. (WANG Wu. Study on key techniques for Circular SAR-GMTI[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2022.) doi:10.27052/d.cnki.gzjgu.2019.000357.
- [10] LI Jianpeng, AN Daoxiang, GE Beibei, et al. Ground moving target parameter estimation and track reconstruction of single-

- channel CSAR[C]// 2020 21st International Radar Symposium(IRS). Warsaw, Poland: IEEE, 2020: 121–124. doi: 10.23919/IRS48640.2020.9253859.
- [11] SHANG Shize, WU Fuwei, LIU Zhenhua, et al. Moving target shadow detection and tracking based on THz video-SAR[C]// 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Chengdu, China: IEEE, 2021: 1–2. doi: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567268.
- [12] 任豪. 太赫兹 SAR 成像技术关键问题研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018. (REN Hao. Research on key issues in terahertz SAR imaging technology[D]. Beijing, China: Beijing Institute of Technology, 2018.) doi:10.26948/d.cnki.gbjlu.2018.001639.
- [13] 王振力, 韩彦明, 兰浩良, 等. 基于多普勒中心频率估计值的 RFrFT-RD 成像算法研究[J]. 现代雷达, 2023, 45(8): 69–73. (WANG Zhenli, HAN Yanming, LAN Haoliang, et al. A study on RFrFT-RD imaging algorithm based on Doppler center frequency estimation[J]. Modern Radar, 2023, 45(8): 69–73.) doi:10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.08.010.
- [14] 吴涵, 吴福伟, 尚士泽, 等. 太赫兹视频 SAR 多普勒中心估计方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(11): 1123–1129. (WU Han, WU Fuwei, SHANG Shize, et al. Doppler centroid frequency estimation method based on THz video-SAR[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(11): 1123–1129.) doi:10.11805/TKYDA2021295.
- [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] WAHL D E, EICHEL P H, GHIGLIA D C, et al. Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3): 827–830. doi:10.1109/7.303752.

#### 作者简介:

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. email: kuangcailj23@163.com.

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.

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.

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.

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.

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.

(上接第 604 页)

- [10] SANKAR R S P, DEEPAK B, CHEPURI S P. Joint communication and radar sensing with reconfigurable intelligent surfaces[C]// 2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Lucca, Italy: IEEE, 2021: 471–475. doi:10.1109/SPAWC51858.2021.9593143.
- [11] 王禄炆. 太赫兹快速数字波束重构超表面研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020. (WANG Luyang. Investigation of terahertz fast digital-beam synthesis on reconfigurable metasurfaces[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.) doi:10.27005/d.cnki.gdzku.2020.002571.

#### 作者简介:

张恒(1994–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹超材料相控阵技术、太赫兹雷达成像. email: hengzhangjj@126.com.

王宏强(1970–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达目标探测与成像、太赫兹技术.

罗成高(1987–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为太赫兹孔径编码雷达、太赫兹单光子雷达和光学三维成像与显示技术.

梁传英(1999–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹探测通信一体化波形设计、太赫兹雷达成像.