

文章编号: 2095-4980(2025)01-0056-05

机载毫米波雷达多普勒中心频率估计方法

尚士泽^{1,2,3}, 周洋^{1,2,3}, 陈亚伟^{1,2,3}, 程强^{1,2,3}, 夏凌昊^{1,2,3}, 杨予昊^{*1,2,3}

(1.南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039; 2.雷达探测感知全国重点实验室, 江苏 南京 210039;
3.江苏省探测感知技术重点实验室, 江苏 南京 210039)

摘要: 由于毫米波雷达波长短, 在一定的脉冲重复频率(PRF)条件下更容易产生方位采样模糊, 且成像质量受多普勒中心频率估计影响较大。为此, 提出一种联合惯导信息和回波包络对称匹配的多普勒中心频率估计方法, 能够为毫米波合成孔径雷达(SAR)成像精确估计多普勒中心频率进而实现稳定连续出图的目的。先利用惯导信息解算方位采样模糊数, 再利用提出的回波包络对称匹配方法实现多普勒中心频率精确估计。该方法估计精确度高且算法复杂度低, 适用于不同频段雷达和多种时频域成像算法, 具有良好普适性。通过对 SAR 图像序列的连续估计以及算法性能对比, 验证了本文算法的有效性。

关键词: 毫米波雷达; 多普勒中心频率估计; 包络对称匹配; 惯导信息

中图分类号: TN958

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024380

Doppler centroid frequency estimation method for airborne millimeter-wave radar

SHANG Shize^{1,2,3}, ZHOU Yang^{1,2,3}, CHEN Yawei^{1,2,3}, CHENG Qiang^{1,2,3}, XIA Linghao^{1,2,3}, YANG Yuhao^{*1,2,3}

(1.Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China;

2.National Key Laboratory of Radar Detection and Sensing, Nanjing Jiangsu 210039, China;

3.Jiangsu Provincial Key Laboratory of Detection and Sensing Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China)

Abstract: Due to the short wavelength of millimeter-wave radar, azimuth sampling ambiguity is more likely to occur under certain Pulse Repetition Frequency(PRF) conditions, and the imaging quality is greatly affected by the estimation of the Doppler center frequency. To address this, a method for estimating the Doppler center frequency by combining inertial navigation information and echo envelope symmetry matching is proposed, which can accurately estimate the Doppler center frequency for millimeter-wave Synthetic Aperture Radar(SAR) imaging, thereby achieving the goal of stable and continuous image generation. Firstly, inertial navigation information is employed to resolve azimuth sampling ambiguity, and then the proposed echo envelope symmetry matching method is adopted to achieve precise estimation of the Doppler center frequency. This method has high estimation accuracy and low algorithm complexity, making it suitable for different frequency band radars and various time-frequency domain imaging algorithms, demonstrating good universality. The effectiveness of the algorithm in this paper is verified through continuous estimation of SAR image sequences and performance comparison of the algorithms.

Keywords: millimeter radar; Doppler centroid estimation; envelope symmetric matching; inertial navigation information

近年来, 毫米波雷达和视频合成孔径雷达成为发展的热点^[1-2], 由于其合成孔径时间短, 能够实现视频级成像, 一些基于毫米波雷达图像序列的相关算法也得到了快速发展^[3-8]。这些基于图像处理的算法的前提是得到连续稳定且高质量的合成孔径雷达(SAR)图像。由于机载 SAR 在工作过程中受到高空气流影响会出现偏航、俯仰和

收稿日期: 2024-08-14; 修回日期: 2024-09-08

*通信作者: 杨予昊 email:rdyyh@hotmail.com

横滚运动，伺服的空稳系统用于保持波束指向的正确性，但微小的运动误差仍会导致波束中心偏离预设方向。多普勒中心频率的偏差直接导致相位偏差和距离徙动，如果不进行正确的估计和补偿，将导致 SAR 图像散焦。文献[9]深入分析了多普勒中心频率估计误差对 SAR 成像的影响，估计误差越大，则能量散焦越严重。尤其针对毫米波等高频段雷达，由于波长短，这种相位偏差对成像效果影响更大。因此在毫米波 SAR 成像过程中，多普勒中心频率估计是必不可少的步骤。

本文提出联合惯导信息解算和回波包络对称匹配的多普勒中心频率估计方法，先利用惯导信息解算方位采样模糊数，再通过回波包络对称匹配实现多普勒中心频率的高精确度估计。本文算法对太赫兹等高频段雷达及大斜视角 SAR 成像具有良好的鲁棒性。相比常规方法，本文方法估计精确度更高，SAR 出图更稳定。

1 基于惯导信息的模糊数估计

雷达惯导信息能够提供飞行的速度信息以及雷达的各种姿态角度。在 SAR 成像过程中，先利用惯导信息进行粗估计，再利用回波数据进行精确估计。在斜视成像或扫描成像中，回波的多普勒频率常超出脉冲重复频率 (PRF) 范围，即产生方位采样模糊，因此利用惯导信息估计出模糊数是十分必要的。

设合成孔径时间内，载机飞行的北向和东向平均速度分别为 v_N 、 v_E ，波束指向方位角度为 θ_{AZ} ，方位角度 0 表示指向正北，并沿顺时针方向增大。根据速度信息计算航向角度 θ_h ：

$$\theta_h = \arctan\left(\frac{v_E}{v_N}\right) \quad (1)$$

利用航向角和波束方位角初步计算斜视角 θ_d 和多普勒中心频率 $f_{dc,0}$ ：

$$\theta_d = \left(\theta_h - \theta_{AZ} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

$$f_{dc,0} = -\frac{2v}{\lambda} \sin \theta_d \quad (3)$$

方位采样模糊数是指多普勒频率超出方位采样频率的倍数：

$$N_{\text{blur}} = \left[\frac{f_{dc,0}}{f_{PR}} \right] \quad (4)$$

式中： f_{PR} 为脉冲重复频率；符号 $[\]$ 表示取整。

图 1 为有无惯导信息模糊数估计的成像结果对比，图 1(a) 为只利用回波信号进行多普勒中心频率估计的成像结果，图 1(b) 为经过惯导信息模糊数估计和基于回波估计的成像结果，从图中可以看出，未经过模糊数处理的图像聚焦效果较差，无法满足图像质量要求。

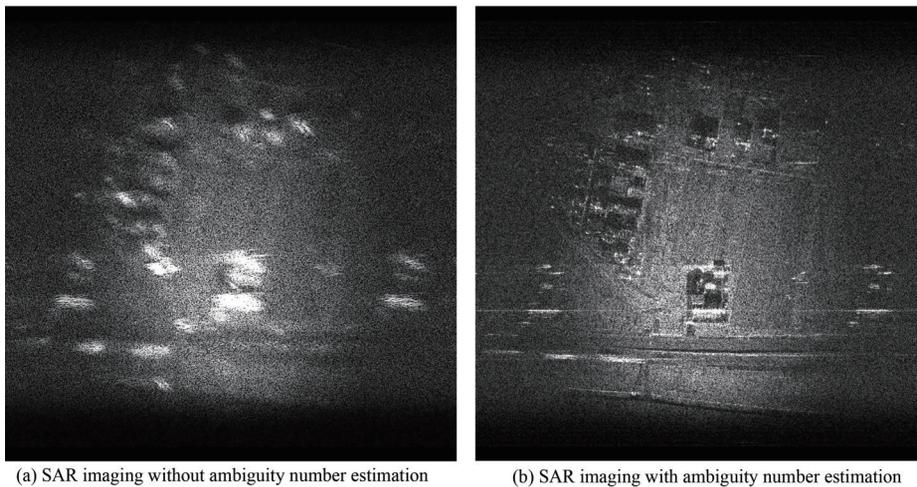


Fig.1 Comparison of imaging results with and without ambiguity number estimation

图 1 有无模糊数估计的成像结果对比

2 基于包络对称匹配的精确估计

尽管利用惯导信息能够估计出多普勒中心频率，但精确度有限，仍需利用回波数据进行精确估计，本文在包络匹配方法基础上进行改进，使估计结果更精确。

2.1 包络曲线提取

回波数据经过距离脉压后用 S 表示，计算 S 的方位频域并取绝对值和开方运算得

$$S_{Fa} = \sqrt{|F_a(S)|} \quad (5)$$

式中： $F_a(\bullet)$ 表示方位向傅里叶变换； $|\bullet|$ 表示绝对值运算。开方运算的目的是降低地面回波内信号强度的对比度，减少强散射点对包络曲线形状的影响。

将 S_{Fa} 中所有数值在距离向上累计求和，得到平均意义上的方位向包络曲线：

$$I_a = \text{sum}_r(S_{Fa}) \quad (6)$$

包络曲线如图 2 所示。当天线指向为正侧视时，包络曲线的中心线应该在方位零频；当天线指向存在斜视角度时，包络曲线的中心线偏离方位中心位置，位置偏离大小与斜视角度正相关。

2.2 包络曲线偏移量计算

理想情况下，包络曲线为对称曲线，且中心线位于方位零频率处。将包络曲线 I_a 进行对称翻转得曲线 I'_a ，将两曲线同时画出可以观察到包络曲线是否偏离中心位置，如图 3 所示，由于 2 条曲线不重合，说明包络曲线不在方位中心。设定位置移动区间为 $[-N, N]$ ，将曲线 I'_a 按照位置移动区间进行逐个像素的循环移位，每次移位则计算一次重合度。本文将重合度定义为 2 条曲线向量差的绝对值的和：

$$c(n) = \text{sum}(|g(I'_a, n) - I_a|) \quad (7)$$

式中 $g(f(\cdot), n)$ 表示对函数 $f(\cdot)$ 做循环移位操作，移动位数为 n ， $n \in [-N, N]$ 。 $c(n)$ 数值越大，说明 2 条曲线重合度越差；反之，说明重合度越好。通过重合度曲线的最小值对应的移动位数，可以得到包络曲线偏离中心线的数值：

$$M = \text{argmin}(c(n))/2 \quad (8)$$

式中： $\text{argmin}(c(n))$ 为函数 $c(n)$ 最小值对应的自变量 n 数值。

2.3 多普勒中心频率估计

设回波数据的方位点数为 N_a ，方位向的频率范围为 $\left[-\frac{f_{PR}}{2}, \frac{f_{PR}}{2}\right]$ ，利用偏移量 M 数值占方位点数的比例可计算得到偏移的频率，此偏移的频率即为多普勒中心频率，多普勒中心频率的符号与偏移量符号相同。多普勒中心频率为：

$$f_{dc} = \frac{M}{N_a} f_{PR} \quad (9)$$

无模糊的多普勒中心频率为模糊数导致的频率偏移与算法估计出多普勒中心频率之和：

$$f'_{dc} = f_{dc} + N_{\text{blur}} f_{PR} = \left(\frac{M}{N_a} + \left[\frac{f_{dc,0}}{f_{PR}} \right] \right) f_{PR} \quad (10)$$

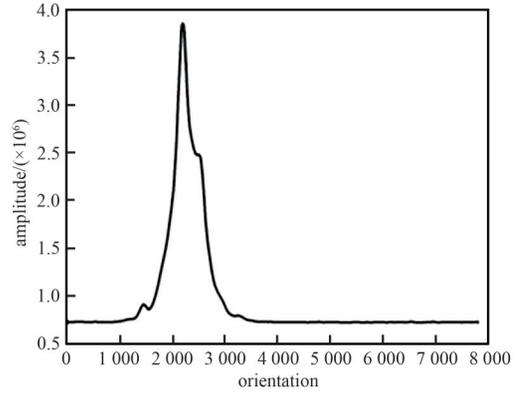


Fig.2 Doppler center frequency estimation results of strabismus SAR image sequences
图2 斜视 SAR 图像序列的多普勒中心频率估计结果

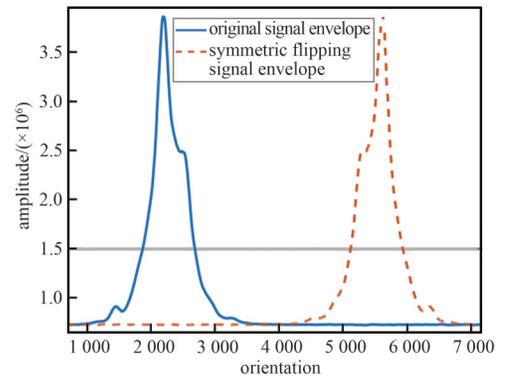


Fig.3 Envelope curve and its symmetric flipping curve
图3 包络曲线和对称翻转包络曲线

按照式(10)对回波数据进行补偿可得到无距离走动的回波信号，将补偿后的包络曲线及其对称翻转曲线重新画图，如图4所示，2条曲线重合很好。

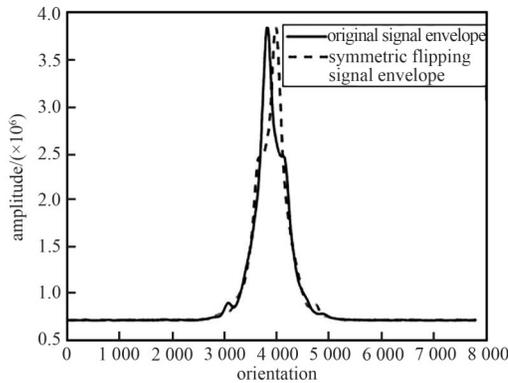


Fig.4 Corrected envelope curve of Doppler center frequency
图4 多普勒中心频率校正后包络曲线

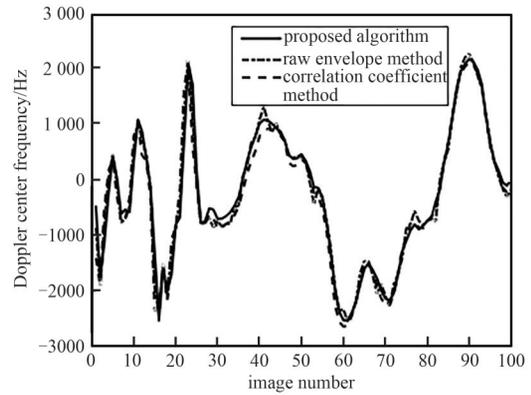


Fig.5 Doppler center frequency estimation results of side-looking SAR image sequences
图5 正侧视SAR图像序列的多普勒中心频率估计结果

3 实验验证

实验中选择正侧视 SAR 数据和大斜视 SAR 数据分别进行验证，并与传统算法进行对比。传统算法选取原始包络居中法和互相关系数法^[10]，由于此两种算法本身均无解模糊功能，因此均使用惯导信息进行模糊数估计再进行性能比较。

数据集1为正侧视 SAR，共产生 100 幅图像，对这些图像的多普勒中心频率估计结果如图5所示。从结果可以看出，3条曲线基本重合，说明3种算法对该数据的估计效果近乎相同。

数据集2为大斜视 SAR，斜视角度为 50°，共产生 74 幅图像，对这些图像的多普勒中心频率估计结果如图6所示。结果表明，本文方法得到的曲线比较平滑，原始包络居中算法存在较大抖动，互相关系数法的估计结果与上述2条曲线偏离大，需通过成像结果进行比较。3种方法得到的 SAR 图像结果如图7所示，多普勒中心频率估计得越准确，则杂波区中心越接近方位零频位置，本文算法估计结果与真实值最接近。由于载机飞行姿态是连续变化的，因此补偿后相邻图像之间多普勒中心频率偏差不应很大，且杂波区中心应在方位零频处，综合图6与图7结果可知，本文算法估计效果最好。

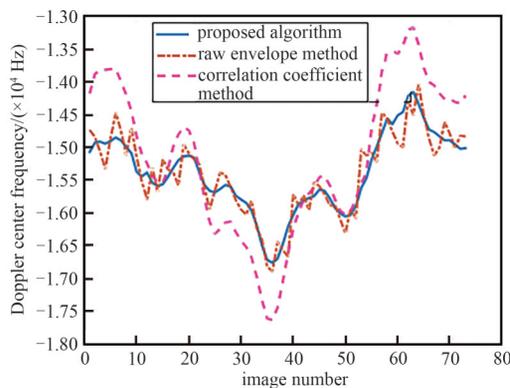


Fig.6 Doppler center frequency estimation result of SAR image sequences with large strabismus
图6 大斜视SAR图像序列的多普勒中心频率估计结果

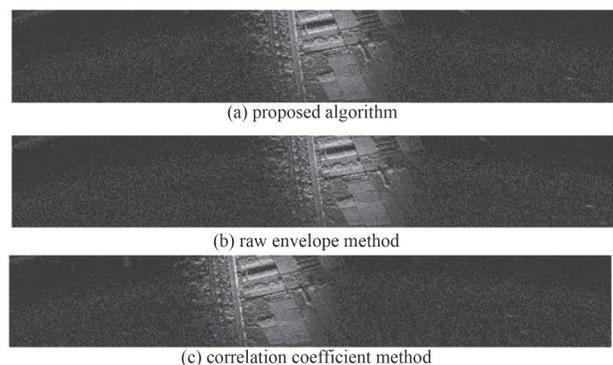


Fig.7 Doppler center frequency estimation results of strabismus SAR image sequences
图7 斜视SAR图像序列的多普勒中心频率估计结果

4 结论

本文提出一种联合惯导信息和回波包络对称匹配的多普勒中心频率估计方法，能够在毫米波雷达 SAR 成像中估计方位采样模糊数基础上精确估计多普勒中心频率。本文算法是在图像域提取参数信息，因此该方法不依赖于雷达频段和成像算法，只通过对包络曲线的翻转、平移、差分和求和操作即可完成多普勒中心频率估计，计算复杂度低，具有良好的普适性，为 SAR 成像过程中的多普勒中心频率估计提供新的思路。

参考文献:

- [1] 吴福伟,刘振华,李大圣,等. 220 GHz 太赫兹合成孔径雷达[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(3):368-371. (WU Fuwei, LIU Zhenhua, LI Dasheng, et al. 220 GHz terahertz Synthetic Aperture Radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(3):368-371.) doi:10.11805/TKYDA201703.0368.
- [2] 金林,吴福伟,杨予昊,等. 机载视频合成孔径雷达成像技术研究[J]. 微波学报, 2020,36(1):45-48. (JIN Lin, WU Fuwei, YANG Yuhao, et al. Study of airborne video synthetic aperture radar[J]. Journal of Microwaves, 2020,36(1):45-48.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.202001008.
- [3] ZHANG Wannan. Combination of SIFT and Canny edge detection for registration between SAR and optical images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022(19):4007205. doi:10.1109/LGRS.2020.3043025.
- [4] ZHANG Xiaoting, WANG Yinghua, LIU Hongwei. Robust optical and SAR image registration based on OS-SIFT and cascaded sample consensus[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022(19):4011605. doi:10.1109/LGRS.2021.3069761.
- [5] DING Jinshan, WEN Liwu, ZHONG Chao. Video SAR moving target indication using deep neural network[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020,58(10):7194-7204. doi:10.1109/TGRS.2020.2980419.
- [6] TIAN X Q, LIU J, MALLICK M, et al. Simultaneous detection and tracking of moving-target shadows in ViSAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021,59(2):1182-1199. doi:10.1109/TGRS.2020.2998782.
- [7] SHANG Shize, WU Fuwei, LIU Zhenhua, et al. Moving target shadow detection and tracking based on THz video-SAR[C]// The 45th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THZ). Chengdu, China: IEEE, 2021: 1-2. doi:10.1109/IRMMW-THZ50926.2021.9567268.
- [8] ZHANG Tingting, GU Hong, SU Weimin, et al. Ground moving target indication and parameter estimation algorithm using deramp space-time adaptive processing[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2021,15(2):024509-1-024509-13.
- [9] 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.
- [10] MADSEN S N. Estimating of the Doppler centroid of SAR data[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992,25(2):134-140. doi:10.1109/7.18675.

作者简介:

尚士泽(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为 SAR 成像及图像处理 .email:313841176@qq.com.

周洋(1990-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达系统设计.

陈亚伟(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达信号处理.

程强(1986-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为雷达信号处理.

夏凌昊(1987-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为雷达系统设计.

杨予昊(1983-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为雷达系统设计.