

一种基于参数更新的机载SAR图像目标定位方法

吴元*

(中国西南电子技术研究所 成都 610036)

摘要: 目标定位精度是机载合成孔径雷达(SAR)系统的一项重要技术指标,因此机载SAR图像目标定位具有重要的应用价值。在基于距离-多普勒模型的SAR图像目标定位方法中,载机运动参数的精度会直接影响定位的精度,在机载平台导航精度受限的情况下,定位精度会受到很大影响。因此,该文提出一种基于距离-多普勒模型参数更新的机载SAR图像目标定位方法,利用机载SAR图像与基准图像匹配得到的匹配点来对载机运动参数进行更新,提高参数的精度,进而提高定位的精度。实验证明了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 距离-多普勒模型; SAR图像定位

中图分类号: TN957.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)05-1063-06

DOI: 10.11999/JEIT180564

An Airborne SAR Image Target Location Algorithm Based on Parameter Refining

WU Yuan

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The target location accuracy is an important technical parameter of airborne SAR system, thus the target location of airborne SAR image is important for application. The precision of the moving parameters directly influences the precision of the SAR image target location algorithm based on the Range-Doppler (RD) model. The locating accuracy is greatly affected if the navigation accuracy of the airborne platform is limited. To solve this problem, an airborne SAR image target location algorithm based on RD model parameter refining is proposed. Using the matching points of airborne SAR image matching with the reference image, the moving parameters are refined with better accuracy, and the locating accuracy is improved. The experiments show that the proposed algorithm is effective.

Key words: SAR; Range-Doppler (RD) model; SAR image location

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像^[1]具有全天候、全天时及远距离等特点,使得SAR成像技术在军事侦查、灾情调查、地质勘测、遥感测绘等领域得到了广泛的应用^[2,3]。图像中目标的位置参数在遥感中是一个很重要的信息量,例如在军事侦察中,需要对SAR图像中感兴趣的军事目标进行精确定位,在民用遥感测绘中,需要对SAR图像中的地物进行精确测量。目标定位精度是机载SAR系统的一项重要技术指标,因此机载SAR图像目标定位具有重要的应用价值。

SAR图像目标定位方法主要分为有控制点的方法和无控制点的方法两类。其中有控制点的方法包括多项式法^[4]和共线方程法^[5],但由于地面控制点

难以获得,此类方法的应用受到了很大限制,无控制点的方法因此得到了广泛的应用。无控制点的方法主要基于距离-多普勒(Range-Doppler, RD)模型^[6]。距离-多普勒模型根据目标的回波延时来确定目标离雷达的距离,建立距离方程,根据目标的多普勒特性来确定目标的方位位置,建立多普勒方程,联合距离方程和多普勒方程进行定位,目标位于等距离同心圆束和等多普勒频移双曲线束的交点上。国内外多位学者基于此模型研究了SAR图像目标定位技术^[7-14],其中文献^[7]研究了无控制点的机载SAR图像直接定位算法;文献^[8]进行了无地面控制点的星载SAR影像直接对地定位研究;文献^[9]推导出地球模型修正公式用于高纬度和高海拔地区的定位;文献^[10,11]分别对机载SAR和星载SAR的定位精度进行了分析,影响定位精度的主要因素之一为平台运动参数;通过对大气折射误差进行校正等措施,国外星载SAR系统的系统级几何定位精度可达

10 m以内^[12]；文献[13]对高分3号星载SAR图像定位精度进行了分析，通过对双频全球定位系统(GPS)进行事后处理获取厘米量级的精密轨道和对大气延迟进行修正等方法，获得了3 m的定位精度。

在基于距离-多普勒模型的SAR图像目标定位方法中，载机运动参数的精度会直接影响定位的精度，在机载平台导航精度受限的情况下，定位精度会受到很大影响。因此，本文提出一种基于距离-多普勒模型参数更新的机载SAR图像目标定位方法，利用机载SAR图像与基准图像匹配得到的匹配点来对模型中的载机运动参数进行更新，提高参数的精度，进而提高定位的精度。

2 机载SAR图像目标定位方法

本文首先利用分块相关匹配算法，把机载SAR图像与基准图像进行配准，求得若干个匹配点；然后根据配准所得若干个匹配点，建立这些匹配点的距离-多普勒方程式，利用最小二乘法对距离-多普勒模型中的载机运动参数进行更新，得到更新后的更精确的载机运动参数；最后根据所得更精确的载机运动参数，采用符合SAR成像原理的距离-多普勒模型来进行SAR图像目标定位。机载SAR目标定位流程如图1所示。

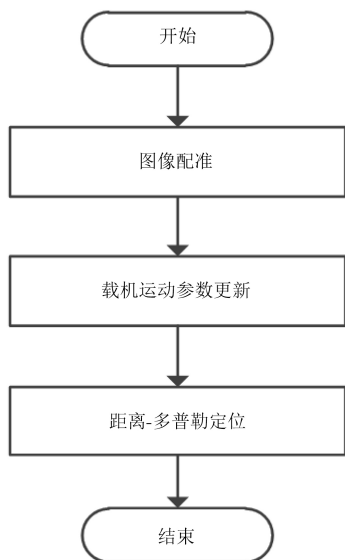


图1 机载SAR图像目标定位方法流程图

2.1 图像配准

利用分块相关匹配算法对机载SAR图像和提前制备的基准图像进行配准，得到 K 个匹配点： (i_k, j_k) 和 (α_k, β_k) ， $k = 1, 2, \dots, K$ 。其中下标 k 表示第 k 个匹配点。 i_k 表示机载SAR图像的行坐标， j_k 表示机载SAR图像的列坐标， α_k 表示基准图像的经度坐标， β_k 表示基准图像的纬度坐标。结合数字

高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，可把基准图像的经纬度坐标 (α_k, β_k) 转换到地心地固(Earth-Centered, Earth-Fixed, ECEF)坐标系，得到 $\mathbf{P}_k = [X_k \ Y_k \ Z_k]^T$ ，其中 X_k 、 Y_k 和 Z_k 分别为ECEF坐标系的3个分量。

2.2 距离-多普勒模型参数更新

首先建立第 k 个匹配点 (i_k, j_k) 和 \mathbf{P}_k 的距离-多普勒方程组

$$F_R^k = R_0 + (i_k - i_0) \Delta R - |\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k| = 0 \quad (1)$$

$$F_D^k = f_{dc} + \frac{2}{\lambda} \frac{(\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k) \cdot \mathbf{V}}{|\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k|} = 0 \quad (2)$$

其中， $k = 1, 2, \dots, K$ ，总共有 $2K$ 个距离-多普勒方程。 F_R^k 表示距离方程， F_D^k 表示多普勒方程， R_0 是场景中心点的斜距， (i_0, j_0) 是场景中心点在图像中的行列坐标， ΔR 是距离分辨率， $\mathbf{P}'_S = \mathbf{P}_S + \mathbf{V} \frac{j_k - j_0}{\text{PRF}} = [X'_S \ Y'_S \ Z'_S]^T$ 是第 k 个目标对应的雷达ECEF坐标， $\mathbf{P}_S = [X_S \ Y_S \ Z_S]^T$ 是雷达参考中心的ECEF坐标， $\mathbf{V} = [V_X \ V_Y \ V_Z]^T$ 是雷达的ECEF速度，PRF是脉冲重复频率， f_{dc} 是多普勒中心， λ 是波长。 $|\cdot|$ 表示向量的长度。“ \cdot ”表示两个向量的数量积。

在式(1)和式(2)中的载机运动参数可以用一个向量来进行表示： $\mathbf{A} = [X_S \ Y_S \ Z_S \ V_X \ V_Y \ V_Z]^T$ ，包括6个值，每一个匹配点可以建立两个距离-多普勒方程，如果利用3个以上的像素点建立6个以上的距离-多普勒方程，就可对载机运动参数的6个值进行求解，从而得到更精确的载机运动参数。从实际应用角度，像素点的数目在满足计算速度要求的前提下要尽可能多，能够得到更精确的载机运动参数。具体步骤为：

(1) 初始化待更新参数：使用惯导参数对 \mathbf{P}_S 和 \mathbf{V} 进行初始化，即对 \mathbf{A} 进行初始化；

(2) 计算 $2K$ 个距离-多普勒方程相对于待更新参数 \mathbf{A} 的雅可比矩阵：

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B^1 \\ B^2 \\ \vdots \\ B^K \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中，

$$\mathbf{B}^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_R^k}{\partial \mathbf{P}_S^T} & \frac{\partial F_R^k}{\partial \mathbf{V}^T} \\ \frac{\partial F_D^k}{\partial \mathbf{P}_S^T} & \frac{\partial F_D^k}{\partial \mathbf{V}^T} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{\partial F_R^k}{\partial \mathbf{P}_S^T} = - \frac{(\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k)^T}{|\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k|} \quad (5)$$

$$\frac{\partial F_R^k}{\partial \mathbf{V}^T} = -\frac{(\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k)^T (j_k - j_0) / \text{PRF}}{|\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k|} \quad (6)$$

$$\frac{\partial F_D^k}{\partial \mathbf{P}_S^T} = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{\mathbf{V}^T}{|\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k|} - \frac{((\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k) \cdot \mathbf{V})(\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k)^T}{(|\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k|)^3} \right) \quad (7)$$

$$\varphi(\mathbf{V}^T) = \mathbf{P}_S^T + \frac{2(j_k - j_0)}{\text{PRF}} \mathbf{V}^T - \mathbf{P}_k^T \quad (8)$$

$$\frac{\partial F_D^k}{\partial \mathbf{V}^T} = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{\varphi(\mathbf{V}^T) |\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k| + ((\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k) \cdot \mathbf{V}) \frac{\partial F_R^k}{\partial \mathbf{V}^T}}{|\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}_k|^2} \right) \quad (9)$$

(3) 计算 $2K$ 个距离-多普勒方程的闭合差向量:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}^1 \\ \mathbf{F}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{F}^K \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中,

$$\mathbf{F}^k = \begin{bmatrix} -F_R^k \\ -F_D^k \end{bmatrix} \quad (11)$$

(4) 更新距离-多普勒参数:

$$\Delta = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{F}) \quad (12)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{A} + \Delta \quad (13)$$

(5) 重复步骤(2)—步骤(4), 直到更新量 Δ 小于阈值。

此时就得到更新后的载体运动参数 \mathbf{A} 。

2.3 距离-多普勒定位

机载SAR图像中待定位目标的行列坐标设为 (i, j) 。针对待定位目标建立距离-多普勒方程组

$$F_R = R_0 + (i - i_0) \Delta R - |\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}| = 0 \quad (14)$$

$$F_D = f_{dc} + \frac{2}{\lambda} \frac{(\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}) \cdot \mathbf{V}}{|\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}|} = 0 \quad (15)$$

$$F_E = \frac{X^2 + Y^2}{(a+h)^2} + \frac{Z^2}{(b+h)^2} - 1 = 0 \quad (16)$$

其中, F_E 表示椭球方程, $\mathbf{P}'_S = \mathbf{P}_S + \mathbf{V} \frac{j - j_0}{\text{PRF}} = [X'_S \ Y'_S \ Z'_S]^T$ 是目标对应的雷达ECEF位置, $\mathbf{P} = [X \ Y \ Z]^T$ 是待定位点的ECEF坐标, a 表示参考椭圆的半长轴长度, b 表示参考椭圆的半短轴长度,

h 表示目标高度。

距离-多普勒定位的具体步骤如下:

(1) 初始化目标高度: 根据场景平均高度对目标高度 h 进行初始化;

(2) 初始化待定位目标的ECEF坐标: 根据场景中心点的粗略经纬度坐标 (α_0, β_0) 和场景平均高度, 可以转换为ECEF坐标 $\mathbf{P}_0 = [X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T$, 用此粗略ECEF坐标初始化待定位目标的ECEF坐标 $\mathbf{P} = [X \ Y \ Z]^T$;

(3) 计算距离-多普勒方程组相对于待定位目标ECEF坐标的雅可比矩阵:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_R}{\partial \mathbf{P}^T} \\ \frac{\partial F_D}{\partial \mathbf{P}^T} \\ \frac{\partial F_E}{\partial \mathbf{P}^T} \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中,

$$\frac{\partial F_R}{\partial \mathbf{P}^T} = \frac{(\mathbf{P}'_S - \mathbf{P})^T}{|\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}|} \quad (18)$$

$$\frac{\partial F_D}{\partial \mathbf{P}^T} = \frac{2}{\lambda} \left(-\frac{\mathbf{V}^T}{|\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}|} + \frac{(\mathbf{P}'_S - \mathbf{P})^T ((\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}) \cdot \mathbf{V})}{|\mathbf{P}'_S - \mathbf{P}|^3} \right) \quad (19)$$

$$\frac{\partial F_E}{\partial \mathbf{P}^T} = \frac{2\mathbf{P}^T}{(a+h)^2} \quad (20)$$

(4) 计算距离-多普勒方程的闭合差向量:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} -F_R \\ -F_D \\ -F_E \end{bmatrix} \quad (21)$$

(5) 更新待定位目标的ECEF坐标:

$$\Delta = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{F}) \quad (22)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{P} + \Delta \quad (23)$$

(6) 重复步骤(3)—步骤(5), 直到更新量 Δ 小于阈值。

此时就得到在当前目标高度 h 下待定位目标的ECEF坐标, 进行坐标转换可得到对应的经纬度坐标;

(7) 根据上一步得到的经纬度坐标从DEM数据中内插得到新的目标高度 h ;

(8) 重复步骤(2)—步骤(7), 直到目标高度差小于阈值。

至此,完成距离-多普勒定位。

本文的研究对象为机载平台,理论上来说本文所提SAR图像目标定位方法同样适用于其它平台,如星载平台、弹载平台,如果平台导航精度受限,可采用本文方法来提高SAR图像目标定位精度。

3 实验

为验证本算法,对某机场的机载SAR图像进行定位实验。机载SAR图像如图2(a)所示,附带场景中心点斜距、多普勒中心、分辨率和载机运动参数等信息。图2(b)为机载SAR图像对应的光学基准图像,带有经纬度坐标信息,是通过商业软件下载的高精度光学图像。为了便于阅读,图2(a)显示的SAR图像经过了旋转与翻转,调整到与图2(b)相似的视角。DEM高程数据采用ASTER GDEM高程数据^[5]。需要说明的是,本文采用光学基准图像来验证本文所提算法,同样可以采用SAR图像来作为基准图像。

在图2(a)的机载SAR图像中选择6个目标,如图中圆圈所示,6个目标同样在图2(b)的基准图中用圆圈进行标注。6个目标放大后如图3所示。目标的真实位置见表1第1行,分别为目标的(经度、纬度和高度),其中经度和纬度是从光学基准图中获取的,高度是根据经纬度从DEM高程数据中获取的,指的是地形的高度,不考虑建筑物本身的高

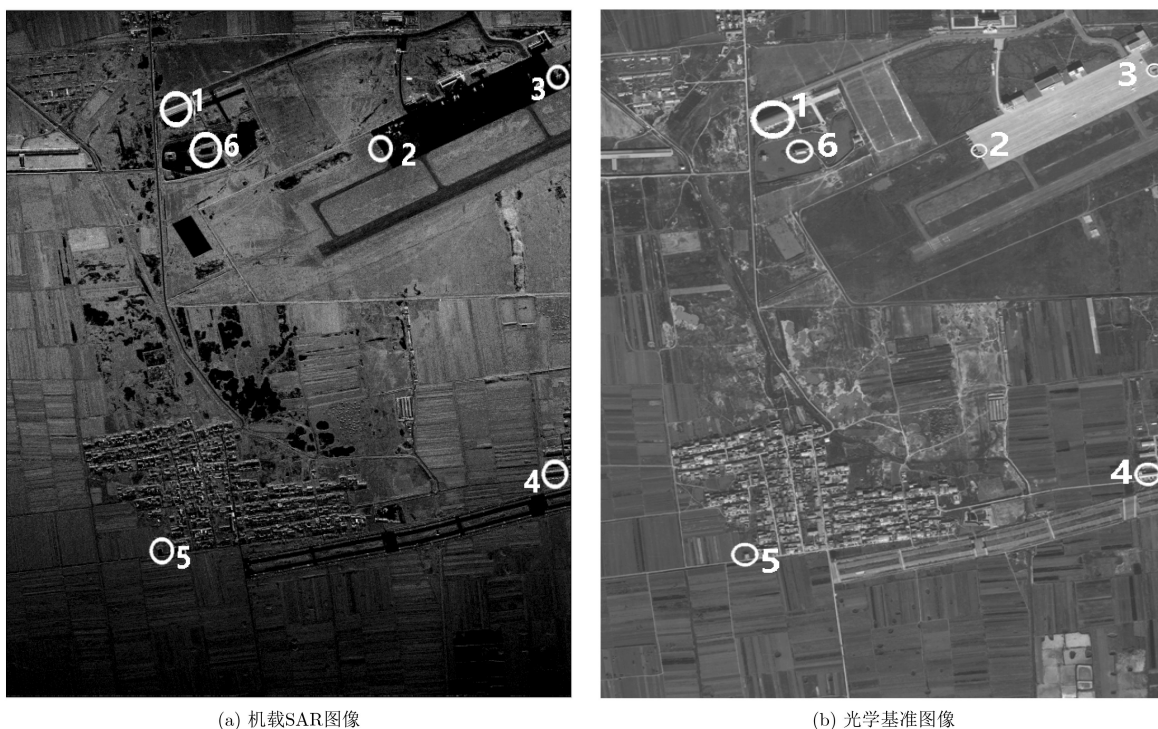
度,所以目标真实的高度只是近似值,没有那么精确,本质上是建筑物所在地面的高度。如果需要精确考虑建筑物本身的高度,需要采用数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)数据。

表1第2行为传统RD方法的定位结果,分别为经度、纬度和高度。以目标的真实经纬高位置为原点建立东北天(ENU)坐标系,其中EN平面代表地面,U坐标为向上方向,然后把真实的经纬高位置和定位结果的经纬高位置都转换到此ENU坐标系下,再计算在EN平面上的距离误差,结果见表1第3行。

表1第4行为本文方法的定位结果,分别为经度、纬度和高度。第5行为本文方法的定位误差,计算方法同第3行。可见,采用本文的定位方法可以大幅提高这些目标的定位精度,其平均定位误差由49.72 m降低到8.02 m。

4 结论

本文针对现有的机载SAR图像定位方法受惯性导航系统提供的载机运动参数影响较大,定位精度不高的问题,提出一种基于距离-多普勒(RD)模型参数更新的机载SAR图像目标定位方法,利用机载SAR图像与基准图像匹配得到的匹配点来对距离-多普勒模型的载机运动参数进行更新,提高参数的精度,进而提高定位的精度。实验证明了本文方法的有效性。



(a) 机载SAR图像

(b) 光学基准图像

图2 机载SAR图像和光学基准图像

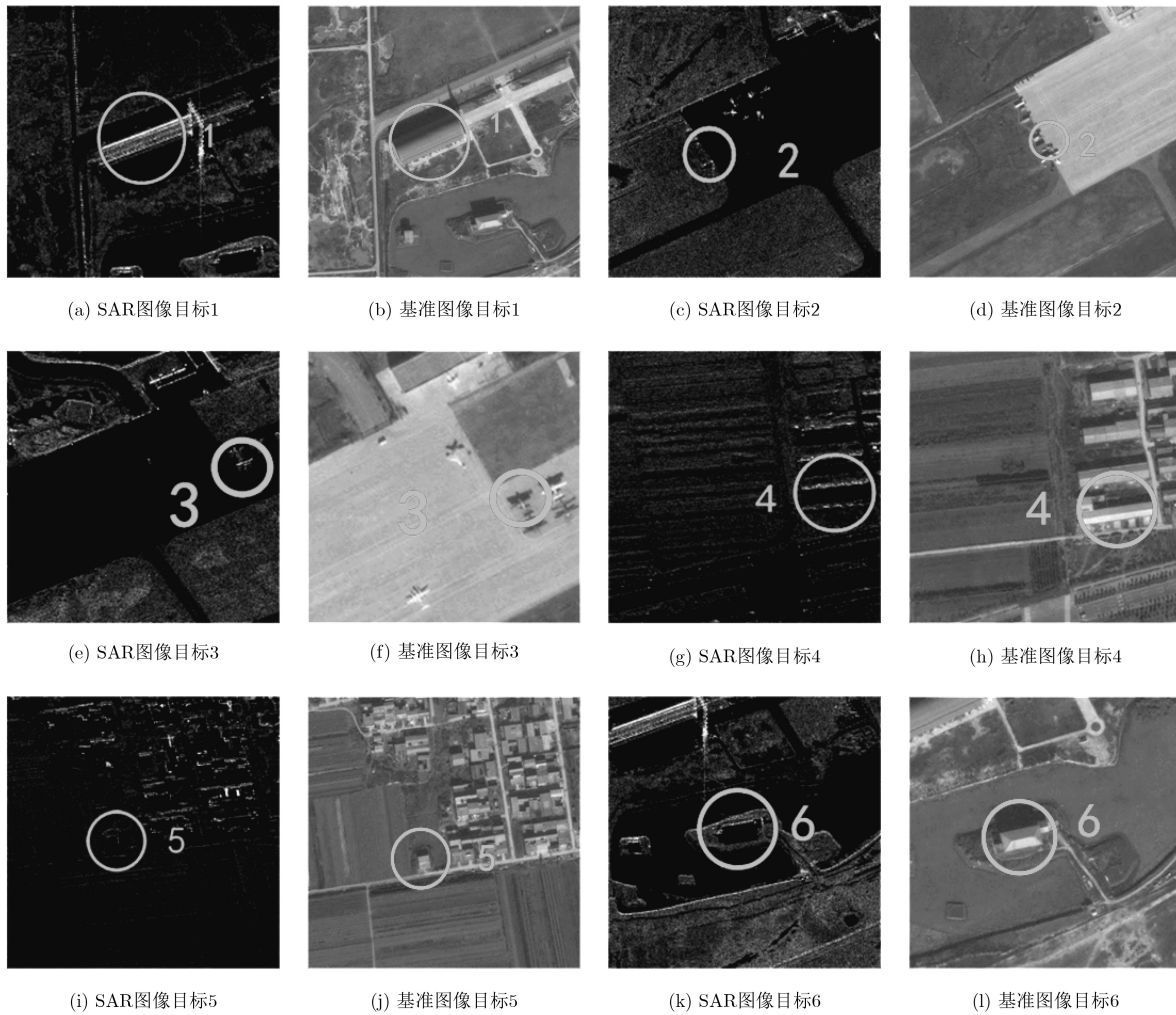


图3 6个目标放大后的图像

表1 定位结果与误差

	目标1	目标2	目标3	目标4	目标5	目标6
真实位置	(109.533047°, 34.834823°, 374 m)	(109.540250°, 34.833684°, 360 m)	(109.546419°, 34.836492°, 370 m)	(109.545977°, 34.823204°, 364 m)	(109.531886°, 34.820393°, 375 m)	(109.534006°, 34.833703°, 369 m)
RD方法结果	(109.532502°, 34.835272°, 375 m)	(109.539727°, 34.834130°, 354 m)	(109.545901°, 34.836621°, 372 m)	(109.545668°, 34.823400°, 372 m)	(109.531688°, 34.820907°, 359 m)	(109.533567°, 34.834173°, 361 m)
RD方法误差(m)	63.05	60.74	57.96	35.29	29.27	51.98
本文方法结果	(109.532917°, 34.834972°, 372 m)	(109.540145°, 34.833778°, 360 m)	(109.546375°, 34.836374°, 372 m)	(109.545927°, 34.823166°, 364 m)	(109.531866°, 34.820466°, 375 m)	(109.533968°, 34.833748°, 372 m)
本文方法误差(m)	15.52	12.23	6.60	5.78	3.49	4.50

参考文献

[1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京, 电子工业出版社, 2005: 2-6.
 [2] 范剑超, 王德毅, 赵建华, 等. 高分三号SAR影像在国家海域使用动态监测中的应用[J]. 雷达学报, 2017, 6(5): 456-472. doi: 10.12000/JR17080.
 FAN Jianchao, FAN Deyi, ZHAO Jianhua, et al. National

sea area use dynamic monitoring based on GF-3 SAR imagery[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(5): 456-472. doi: 10.12000/JR17080.
 [3] 刘泽宇, 柳彬, 郭炜炜, 等. 高分三号NSC模式SAR图像舰船目标检测初探[J]. 雷达学报, 2017, 6(5): 473-482. doi: 10.12000/JR17059.
 LIU Zeyu, LIU Bin, GUO Weiwei, et al. Ship detection in

- GF-3 NSC mode SAR images[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(5): 473–482. doi: [10.12000/JR17059](https://doi.org/10.12000/JR17059).
- [4] 周金萍. SAR产品图像像素定位方法选择与参数优化[J]. 上海航天, 2000(1): 32–39. doi: [10.19328/j.cnki.1006-1630.2000.01.007](https://doi.org/10.19328/j.cnki.1006-1630.2000.01.007).
- ZHOU Jinping. Selection and optimization of the location method for pixels in SAR imagery[J]. *Aerospace Shanghai*, 2000(1): 32–39. doi: [10.19328/j.cnki.1006-1630.2000.01.007](https://doi.org/10.19328/j.cnki.1006-1630.2000.01.007).
- [5] 尤红建, 丁赤飏, 付琨. SAR图像对地定位的严密共线方程模型[J]. 测绘学报, 2007, 36(2): 158–162. doi: [10.3321/j.issn:1001-1595.2007.02.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-1595.2007.02.008).
- YOU Hongjian, DING Chibiao, and FU Kun. SAR image localization using rigorous SAR collinearity equation model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(2): 158–162. doi: [10.3321/j.issn:1001-1595.2007.02.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-1595.2007.02.008).
- [6] JOHN C C and ROBERT M M. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1991: 1–100.
- [7] 张耀天, 孙进平, 毛士艺. 机载SAR图像直接定位算法研究[J]. 信号处理, 2009, 25(4): 669–673. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2009.04.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2009.04.032).
- ZHANG Yaotian, SUN Jinping, and MAO Shiyi. Study on direct location algorithm for airborne SAR image[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(4): 669–673. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2009.04.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2009.04.032).
- [8] 杨杰, 潘斌, 李德仁, 等. 无地面控制点的星载SAR影像直接对地定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(2): 144–147. doi: [10.3969/j.issn.1671-8860.2006.02.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-8860.2006.02.013).
- YANG Jie, PAN Bin, LI Deren, *et al.* Location of spaceborne SAR imagery without reference points[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(2): 144–147. doi: [10.3969/j.issn.1671-8860.2006.02.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-8860.2006.02.013).
- [9] 傅文学, 郭小方, 田庆久. 星载SAR距离-多普勒定位算法中地球模型的修正[J]. 测绘学报, 2008, 37(1): 59–63. doi: [10.3321/j.issn:1001-1595.2008.01.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-1595.2008.01.011).
- FU Wenxue, GUO Xiaofang, and TIAN Qingjiu. Correction of earth model in range-doppler location algorithm[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(1): 59–63. doi: [10.3321/j.issn:1001-1595.2008.01.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-1595.2008.01.011).
- [10] 尤红建, 丁赤彪, 向茂生. 机载高分辨率SAR图像直接对地定位原理及精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(8): 712–715. doi: [10.3969/j.issn.1671-8860.2005.08.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-8860.2005.08.013).
- YOU Hongjian, DING Chibiao, and XIANG Maosheng. Principle and accuracy for airborne SAR image direct localization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(8): 712–715. doi: [10.3969/j.issn.1671-8860.2005.08.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-8860.2005.08.013).
- [11] 陆静, 郭克成, 陆洪涛. 星载SAR图像距离-多普勒定位精度分析[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(2): 102–106. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.005).
- LU Jing, GUO Kecheng, and LU Hongtao. Analysis of R-D location precision in spaceborne SAR image[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(2): 102–106. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.005).
- [12] SCHUBERT A, SMALL D, JEHLE M, *et al.* COSMO-skymed, Terra SAR-X, and RADARSAT-2 geolocation accuracy after compensation for earth-system effects[C]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012: 3301–3304.
- [13] 丁赤飏, 刘佳音, 雷斌, 等. 高分三号SAR卫星系统级几何定位精度初探[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 11–16. doi: [10.12000/JR17024](https://doi.org/10.12000/JR17024).
- DING Chibiao, LIU Jiayin, LEI Bin, *et al.* Preliminary exploration of systematic geolocation accuracy of GF-3 SAR satellite system[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 11–16. doi: [10.12000/JR17024](https://doi.org/10.12000/JR17024).
- [14] 梅海文, 孟自强, 李亚超, 等. 双基前视SAR几何定位及同步误差分析[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4): 882–889. doi: [10.11999/JEIT170677](https://doi.org/10.11999/JEIT170677).
- MEI Haiwen, MENG Ziqiang, LI Yachao, *et al.* Bistatic forward-looking SAR geometrical positioning and analysis of synchronization error[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 882–889. doi: [10.11999/JEIT170677](https://doi.org/10.11999/JEIT170677).
- [15] YUE Linwei, SHEN Huanfeng, ZHANG Liangpei, *et al.* High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017, 123: 20–34. doi: [10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002).
- 吴元: 男, 1987年生, 工程师, 研究方向为合成孔径雷达成像与图像处理。