考虑运动补偿的机载SAR定位误差传递模型及航迹标定方法

高 铭¹²³ 仇晓兰*¹² 孟大地¹² 黄丽佳¹² 丁赤飚¹²³

^①(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)
 ^②(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190)

③(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要:机载合成孔径雷达(SAR)定位误差不仅受载机位置/速度测量误差、系统时间误差等的影响,还与运动补偿残余误差有关。然而现有机载SAR定位模型很少考虑运动补偿误差的影响。该文针对实际中普遍存在的含运动误差和载机航迹测量误差的情况,结合运动补偿和频域成像算法,推导了机载SAR图像定位误差传递模型,阐明 了运动补偿残余误差影响下航迹测量误差对定位偏差的影响方式,并基于该模型给出了载机航迹测量误差的标定 方法。仿真实验验证了该定位误差传递模型的正确性,相比于不考虑运动补偿残余误差的定位模型,得到了更高 精度的航迹测量误差标定结果,证明了该方法的优越性。

 关键词:机载合成孔径雷达;定位误差传递模型;航迹测量误差标定;运动补偿;频域成像算法

 中图分类号:TN957.52
 文献标识码:A
 文章编号: 2095-283X(2021)04-0646-10

 DOI: 10.12000/JR21018
 文献标识码:A
 文章编号: 2095-283X(2021)04-0646-10

引用格式:高铭,仇晓兰,孟大地,等.考虑运动补偿的机载SAR定位误差传递模型及航迹标定方法[J].雷达学报, 2021,10(4):646-655.doi:10.12000/JR21018.

Reference format: GAO Ming, QIU Xiaolan, MENG Dadi, *et al.* Geolocation error transfer model and trajectory calibration method of airborne SAR considering the motion compensation residual error[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(4): 646–655. doi: 10.12000/JR21018.

Geolocation Error Transfer Model and Trajectory Calibration Method for Airborne SAR Considering Motion Compensation Residual Error

 $\begin{array}{ccc} {\rm GAO\ Ming^{\oplus 2 \ensuremath{3}\ensuremath{2}\ensuremath{3}\ensuremath{2}\ensuremath{3}\ensuremath{2}\ensuremath{3}\ensuremath{2}\ensuremath{3}\ensuremath{2}\ensuremath{3}\ensuremath{2}\ensuremath{3}\en$

^①(Key Laboratory of Technology in Geospatial Information Processing and Application System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

⁽²⁾(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

³(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Airborne Synthetic Aperture Radar (SAR) location error is affected by the position/speed measurement error of the aircraft, system time error, etc., and also related to the residual error of motion compensation. However, the existing airborne SAR location model rarely considers the effect of residual motion error. Considering that motion and trajectory measurement errors are common in practice, this paper derives a location error transfer model of an airborne SAR image based on the motion compensation and frequency-domain imaging algorithms. The proposed model clarifies the influence of trajectory measurement error on location deviation when residual motion error exists and provides a method of error calibration measurement. The simulation experiments validate the correctness of the proposed location error transfer model. The present method obtains a more accurate error calibration measurement result than the location error model that does not consider the residual motion error, proving the superiority of the proposed model.

收稿日期: 2021-03-02; 改回日期: 2021-05-08; 网络出版: 2021-05-27 *通信作者: 仇晓兰 xlqiu@mail.ie.ac.cn *Corresponding Author: QIU Xiaolan, xlqiu@mail.ie.ac.cn 基金项目: 国家自然科学基金(62022082, 61991424) Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62022082, 61991424) 责任主命, 却程 Corresponding Editory HU Chang

责任主编: 胡程 Corresponding Editor: HU Cheng

Key words: Airborne synthetic aperture radar; Geolocation error transfer model; Trajectory measurement error calibration; Motion compensation; Frequency-domain imaging algorithm

1 引言

机载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有高分辨率成像和高精度目标定位能力^[1,2], 在地图测绘、国土资源勘察、灾害监测等方面有重 要作用。机载SAR图像的定位误差主要受载机平台 位置和速度测量误差、系统延迟测量误差等的影 响。此外,载机在实际飞行中会受到气流的影响, 产生运动误差,成像处理中为了得到聚焦良好的图 像,通常需要进行运动补偿。由于运动误差具有随 距离和方位向的空变性,运动补偿处理很难实现对 每个位置目标运动误差的完全补偿,难免存在运动 补偿残余误差,该残余误差不仅影响聚焦质量,也 会带来定位误差。建立考虑运动补偿残余误差下的 机载SAR定位误差传递模型,对于航迹测量误差的 标定,进而实现弱导航信息下的高精度定位具有重 要意义。

近年来已经有许多关于机载SAR定位误差的研究。其中,文献[3]分析了距离向和方位向位置、速度误差对定位精度的影响,得出了距离向速度误差 是影响定位精度的主要因素的结论。文献[4]则分析 了更多影响因素,给出了多普勒中心估计误差、系 统时间延迟测量误差等对定位精度的影响方式。文 献[5]认为各项误差对定位精度的影响近似互不相 关,因此将总体定位误差近似等效为各项误差引起 定位误差的均方根。上述研究大多基于匀速直线运 动模型,文献[6]则进一步结合BP成像算法研究了 在曲线航迹下航迹测量误差对定位精度的影响,并 给出了曲线航迹下的定位误差表达式。然而,上述 研究均未考虑运动误差和运动补偿处理过程,误差 传递模型考虑因素不够全面。

现有机载SAR成像处理中已有很多关于运动误 差补偿的研究^[7,8],但鲜有研究给出运动补偿残余 误差对SAR图像定位的影响模型。文献[9]推导了机 载SAR天线相位中心(Antenna Phase Center, APC)位置误差、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)误差、系统时延等引起的运动补偿残 余相位误差,并仿真分析了其对成像质量的影响; 文献[10]在参考高程存在误差的情况下建立了运动 补偿残余误差对机载双天线InSAR干涉相位的影响 模型,进而分析了由干涉相位误差引入的高程和平 面定位误差;文献[11]指出机载InSAR干涉图中残 余运动误差的影响主要有方位相位起伏和方位配准 误差;文献[12]则考虑了残余运动误差在机载重轨 干涉SAR系统中导致的时变基线误差,并提出了一种估算时变基线误差的方法; 文献[13]虽然给出了运动补偿残余相位误差的线性项与方位向几何定位误差的关系,但其在假设不存在航迹测量误差的情况下进行考虑。可见,现有研究主要分析了运动补偿残余误差对成像质量或干涉测量的影响,但并未给出运动补偿残余误差对机载SAR定位误差影响的解析表达式,且均未考虑运动补偿残余误差和航迹测量误差均存在的情况,不利于对定位误差影响的理解,更不利于对误差源的标定。

本文推导了航迹测量误差和运动补偿残余误差 影响下的机载SAR定位误差解析模型,并进一步给 出了基于该模型的航迹测量误差标定方法,得到了 接近真实航迹的标定结果,证明了方法的正确性和 有效性。

本文后续内容如下:第2节给出含运动误差和 航迹测量误差的机载SAR信号模型;第3节推导建 立运动补偿残余误差影响下的定位误差传递模型, 并给出航迹测量误差标定方法;第4节进行仿真实 验,验证误差传递模型和标定方法的正确性,通过 对比实验证明模型的优越性,并且对定标点测量误 差进行了考虑;第5节进行总结与展望。

2 机载SAR信号模型

机载SAR几何关系如图1所示。假设存在航迹 误差的SAR平台只在水平方向(*x*轴)和高度方向 (*z*轴)有误差,在前进方向(*y*轴)无误差或已通过方 位重采样补偿了*y*轴方向的误差。载机的运动误差 使实际航迹偏离理想直线,同时航迹测量误差又使 测量航迹偏离实际航迹。



Fig. 1 Airborne SAR geometry

如图1所示, P为SAR平台的实际位置, P'为 对应的测量位置, P₀为该时刻参考直线航迹上的对 应位置; T为地面目标点的真实位置; T'为对点 T成像所得的成像点位置,位于斜距值为R的距离 单元; T与T'的位置差即为定位误差; T₀是与T'位 于相同距离单元,但方位向处在波束中心处的点。

SAR平台沿实际航迹运动并获取回波,得到 T点的回波信号在距离压缩后有如下形式:

$$S_{\text{real}}(t,\eta) = \text{rect}\left(\frac{\eta}{T_{\text{syn}}}\right) \operatorname{sinc}\left(t - \frac{2R_{\text{real}}(\eta)}{c}\right)$$
$$\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R_{\text{real}}(\eta)\right) \tag{1}$$

其中,t为距离向快时间, η 为方位向慢时间,设 T点的合成孔径中心时刻为方位向0时刻, T_{syn} 为合 成孔径时间, $R_{real}(\eta)$ 为实际航迹和目标点之间的距 离历程。

运动误差的存在使得目标的回波信号与匀速直 线运动下的信号不同,不利于Chirp Scaling, Omega-K等频域成像算法的批量处理,因此需要 进行运动补偿。目前已有很多对频域成像算法和运 动补偿步骤进行结合的研究^[14,15]。本文使用相比于 两步运动补偿^[16]而言精度更高的一步运动补偿^[17]方 法,先根据测量航迹选择参考直线航迹,再利用测 量航迹与参考直线航迹之间的偏差值对回波信号进 行补偿处理。一般情况下主要考虑运动误差的距离 空变性,而忽略其方位空变性^[18,19],本文对处在同 一距离单元不同方位位置的目标,都采用该距离单 元对应的斜距作为参考斜距进行补偿。

如图2所示,运动补偿量为视线方向的误差^[20] Δ*R*(η)。在进行一步运动补偿时,对各个不同的距 离单元补偿不同的相位。对斜距值为*R*的距离单元 补偿如下相位

$$\Phi_{\rm R} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(\eta) \tag{2}$$

其中, $\Delta R(\eta)$ 如下:







$$\Delta R(\eta) = R_{\rm m}(\eta) - R_{\rm ref}(\eta) \approx (z_{\rm m}(\eta) - h_{\rm ref}) \frac{h_{\rm ref}}{R} - (x_{\rm m}(\eta) - x_{\rm ref}) \frac{\sqrt{R^2 - h_{\rm ref}^2}}{R}$$
(3)

 $R_{\rm m}(\eta)$ 和 $R_{\rm ref}(\eta)$ 分别表示测量航迹和参考直线 航迹与目标点之间的距离, $x_{\rm m}(\eta)$ 和 $z_{\rm m}(\eta)$ 分别表示 测量航迹的水平和高程坐标, $x_{\rm ref}$ 和 $h_{\rm ref}$ 分别表示参 考直线航迹的水平和高程坐标。

进行运动补偿后,斜距值为R的距离门对应的 相位为

$$\Phi_{\rm moco} = -\frac{4\pi}{\lambda} R_{\rm moco}(\eta) \tag{4}$$

其中

$$R_{\text{moco}}(\eta) = R_{\text{real}}(\eta) - \Delta R(\eta)$$
(5)

完成运动补偿后,用参考直线航迹对运动补偿 之后的信号进行建模成像和基于距离多普勒模型的 几何校正,得到对应的成像点*T*'。设该成像点与参 考直线航迹之间的距离历程为*R*_{img}(η),根据SAR成 像原理可知,该距离历程与运动补偿之后信号相位 所对应的距离历程*R*_{moco}(η)是匹配的,即

$$R_{\rm moco}(\eta) \approx R_{\rm img}(\eta)$$
 (6)

下文根据该距离历程匹配关系,推导定位误差 传递模型,并得到航迹测量误差的标定方法。

3 定位误差传递模型及航迹标定方法

3.1 定位误差传递模型

为了标定整个航迹的误差,将整个航迹划分成 一系列子孔径。在单个子孔径内,设机载SAR平台 在前进方向(y轴)无误差,做匀速直线运动,而在 水平方向(x轴)和高度方向(z轴)有运动误差。

除运动误差外,对于不可忽略的航迹测量误差,设方位向测量误差为零,主要考虑水平方向和 高度方向。

测量误差设为如式(7)形式,其中包括恒定的 速度误差c₁, d₁和位置偏移c₀, d₀:

$$[c_1\eta + c_0 \ 0 \ d_1\eta + d_0] \tag{7}$$

子孔径内的测量航迹用二次多项式表示为

$$[x_{\rm m}(\eta) \ y_{\rm m}(\eta) \ z_{\rm m}(\eta)] \tag{8}$$

其中

$$x_{\rm m}(\eta) = a_2 \eta^2 + a_1 \eta + x_{\rm ref}$$
 (9)

$$y_{\rm m}(\eta) = v\eta + y_{\rm ref} \tag{10}$$

$$z_{\rm m}(\eta) = b_2 \eta^2 + b_1 \eta + h_{\rm ref}$$
 (11)

 $a_2 \pi b_2$ 为测量航迹关于方位向慢时间 η 的二次项 系数, a_1 , $v \pi b_1$ 为一次项系数, x_{ref} , $y_{ref} \pi h_{ref}$ 为常 数项。 真实航迹是测量航迹与航迹测量误差之间的差 值,用二次多项式表示为

$$[x_{\text{real}}(\eta) \ y_{\text{real}}(\eta) \ z_{\text{real}}(\eta)]$$
(12)

其中

$$x_{\rm real}(\eta) = a_2 \eta^2 + a_1 \eta + x_{\rm ref} - c_1 \eta - c_0 \tag{13}$$

$$y_{\rm real}(\eta) = v\eta + y_{\rm ref} \tag{14}$$

$$z_{\text{real}}(\eta) = b_2 \eta^2 + b_1 \eta + h_{\text{ref}} - d_1 \eta - d_0$$
(15)

在实际中,平台的真实运动航迹是不可获得 的,但测量航迹是由传感器得到的已知量。因此, 运动补偿需要基于测量航迹进行。根据测量航迹选 择运动补偿的参考直线航迹为

$$[x_{\rm ref} \ v\eta + y_{\rm ref} \ h_{\rm ref}] \tag{16}$$

由测量航迹和参考直线,可以得出两者之间的 偏差,近似为运动误差:

$$[a_2\eta^2 + a_1\eta \ 0 \ b_2\eta^2 + b_1\eta] \tag{17}$$

利用该误差计算视线方向误差: 将式(19)进行泰勒展开可得

$$\Delta R(\eta) \approx (b_2 \eta^2 + b_1 \eta) \frac{h_{\text{ref}}}{R} - (a_2 \eta^2 + a_1 \eta) \frac{\sqrt{R^2 - h_{\text{ref}}^2}}{R}$$
(18)

设地面目标点 $P = [x_0 \ y_0 \ 0]$,其对应的成像点 $P' = [x_0 + \Delta x \ y_0 + \Delta y \ 0], x_0, y_0$ 为目标点的真实坐 标,而 $\Delta x, \Delta y$ 为目标点的定位误差。

在SAR平台飞行获取回波时,真实航迹和目标 点之间的真实距离历程为

$$R_{\text{real}}(\eta) = \sqrt{(x_{\text{real}}(\eta) - x_0)^2 + (y_{\text{real}}(\eta) - y_0)^2 + (z_{\text{real}}(\eta))^2}$$
(19)

$$X = x_0 + c_0 - x_{ref} \tag{20}$$

$$X = x_0 + c_0 - x_{\text{ref}} \tag{20}$$

$$Y = y_0 - y_{\rm ref} \tag{21}$$

$$Z = h_{\rm ref} - d_0 \tag{22}$$

$$M(\eta) = \sqrt{X^2 + (Y - v\eta)^2 + Z^2}$$
(23)

$$R_{\text{real}}(\eta) = \sqrt{\left(a_2\eta^2 + a_1\eta + x_{\text{ref}} - c_1\eta - c_0 - x_0\right)^2 + \left(v\eta + y_{\text{ref}} - y_0\right)^2 + \left(b_2\eta^2 + b_1\eta + h_{\text{ref}} - d_1\eta - d_0\right)^2} \\\approx M(\eta) + \frac{-X(a_2\eta^2 + a_1\eta - c_1\eta) + Z(b_2\eta^2 + b_1\eta - d_1\eta)}{M(\eta)}$$
(24)

设

又设变量N为

$$N = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$
(25)

对斜距值为R的距离门进行运动补偿之后的相位所对应的距离历程为

$$R_{\text{moco}}(\eta) = R_{\text{real}}(\eta) - \Delta R(\eta)$$

$$\approx M(\eta) + \frac{-X(a_2\eta^2 + a_1\eta - c_1\eta) + Z(b_2\eta^2 + b_1\eta - d_1\eta)}{M(\eta)}$$

$$- \frac{N}{M(\eta)} \left((b_2\eta^2 + b_1\eta) \frac{h_{\text{ref}}}{R} - (a_2\eta^2 + a_1\eta) \frac{\sqrt{R^2 - h_{\text{ref}}^2}}{R} \right)$$
(26)

参考直线航迹和成像点之间的距离历程为

$$R_{\rm img}(\eta) = \sqrt{(x_{\rm ref} - x_0 - \Delta x)^2 + (v\eta + y_{\rm ref} - y_0 - \Delta y)^2 + (h_{\rm ref})^2}$$
(27)

由于定位误差 Δx 和 Δy 可能比较大,1阶泰勒展开精度不够,故对其进行2阶泰勒展开,结果为

$$R_{\rm img}(\eta) \approx M(\eta) + \frac{X(\Delta x - c_0) + (Y - v\eta)\Delta y + Zd_0}{M(\eta)} + \frac{(Y^2 + Z^2)(\Delta x - c_0)^2 + (X^2 + Y^2)d_0^2 + (X^2 + Z^2)\Delta y^2}{2N^2 M(\eta)} - \frac{XY(\Delta x - c_0)\Delta y + XZ(\Delta x - c_0)d_0 + YZ\Delta yd_0}{N^2 M(\eta)}$$
(28)

可知,式(26)和式(28)中的两个距离历程 $R_{\text{moco}}(\eta)$ 和 $R_{\text{img}}(\eta)$ 只有分式中除 $M(\eta)$ 之外的部分形式不同。由于两个距离历程应是匹配的,其分式中除 $M(\eta)$ 之外的部分也应尽量相等。

首先,令式(26)和式(28)的分式中除M(η)之外的部分的η的一次项系数相等,可以得到如下关系:

$$\Delta y \approx \frac{\left(X - N\frac{\sqrt{R^2 - h_{\rm ref}^2}}{R}\right)a_1 - \left(Z - N\frac{h_{\rm ref}}{R}\right)b_1}{v} - \frac{Xc_1 - Zd_1}{v}$$
(29)

式(29)即为方位向定位误差Δy的表达式。从式(4)可以看出,方位向定位误差受目标点自身的位置、平 台的运动误差和航迹测量误差共同影响。

同理,令距离历程 $R_{\text{moco}}(\eta)$ 和 $R_{\text{img}}(\eta)$ 的分式中除 $M(\eta)$ 之外部分的常数项相等,可得

$$X(\Delta x - c_0) + Y\Delta y + Zd_0 \approx \frac{XY(\Delta x - c_0)\Delta y + XZ(\Delta x - c_0)d_0 + YZ\Delta yd_0}{N^2} - \frac{(Y^2 + Z^2)(\Delta x - c_0)^2 + (X^2 + Y^2)d_0^2}{2N^2} - \frac{(X^2 + Z^2)\Delta y^2}{2N^2}$$
(30)

设变量K为

$$K = Y^2 + Z^2 \tag{31}$$

整理式(30)可得定位误差 Δx 的表达式为

$$\Delta x \approx \sqrt{\frac{2N^2}{K} \cdot \left(-Y\Delta y - Zd_0 + \frac{2YZ\Delta yd_0}{2N^2} - \frac{(X^2 + Y^2)d_0^2 + (X^2 + Z^2)\Delta y^2}{2N^2}\right) + \left(\frac{(N^2 - Y\Delta y - Zd_0)X}{K}\right)^2}{-\frac{(N^2 - Y\Delta y - Zd_0)X}{K} + c_0}$$
(32)

从式(32)可以看出,定位误差Δ*x*同样受目标点 自身的位置、平台的运动误差和航迹测量误差共同 影响。

3.2 航迹测量误差标定方法

推导出的定位误差传递模型不仅阐明了误差源 的影响方式,同时还提供了测量误差标定的方法。 由于定位误差随目标点自身位置变化而变化,因 此,可以通过在地面上设置多个定标点,利用不同 的定标点坐标建立多组方程进行联立,求解出公式 中所涉及的测量误差,从而得到接近真实值的标定 航迹。

航迹测量误差标定方法如下:

首先,标定方法中各参数在具体实现时均可获 得。公式中的速度测量值、定标点坐标和测量航迹 参数均可通过测量来获得,公式中的斜距值可由采 样时延算得。此外,通过成像处理可以得到定标点 的成像位置,利用该位置能够计算出其地理坐标, 该坐标与其真实值之差即为定标点的定位误差,因 此定位误差也可在具体实现时获得。

设置m个地面目标点作为控制点。首先,用各目标点坐标[x1 y1],[x2 y2],[x3 y3]…代替式(30)中的 [x0 y0]建立m个等式。在这组等式中,除c0和d0以外的其他变量均已知,因此,对其进行非线性最小 二乘求解,可以解出测量误差的常数项c0和d0。

将得到的c₀和d₀代入式(29),并且也用各目标 点坐标[x₁ y₁], [x₂ y₂], [x₃ y₃]…代替式(29)中的 [x₀ y₀]建立m个等式。在这组等式中,除c₁和d₁之 外的其他变量均已知,因此,对其进行最小二乘求 解,可以解出测量误差的一次项系数c₁和d₁。

如此便完成了对测量误差的标定。用已知的测 量航迹减去标定出的测量误差,可以得出比较接近 真实航迹的标定航迹。

4 仿真实验与分析

4.1 验证定位误差传递模型

设置3个地面目标点,分别计算其实际定位误差和由所推公式算得的定位误差,比较验证定位误差传递模型的准确性。仿真参数如表1所示。

Tab. 1 Simulation parameters of location error 参数 数值 30 载波频率(GHz) 信号带宽(MHz) 200脉冲持续时间(µs) 1 1000 脉冲重复频率(Hz) 方位向天线尺寸(m) 270平台速度(m/s) 0 斜视角(°) 目标点1坐标(m) (330, 0, 0)目标点2坐标(m) (400, 0, 0)目标点3坐标(m) (470, 0, 0)

表 1 定位误差仿真参数

图3给出了成像结果,红色 "●"表示成像点位置, 白色 "+"表示载机沿参考直线航迹飞行时点目标 在图像中的位置,可见当存在运动误差和测量误差时, 运动补偿和成像后目标成像结果偏离了理想位置。

如表2和表3所示,分别在y方向和x方向计算 3个目标点的实际定位误差、由定位误差传递公式 算得的定位误差,以及两误差的偏差值。

由仿真结果可知,在y方向和x方向上,实际定 位误差和由定位误差传递公式计算得到的值基本一 致。仿真结果证明了本文提出的定位误差传递模型 的准确性。

4.2 测量误差标定

仿真在单个子孔径内,机载SAR平台实际航迹 与测量航迹的设置如图4所示,标明定标点的仿真 场景如图5所示。



图 3 成像结果图

Fig. 3 Diagram of imaging results

	表 2 y方向定位误差
Tab. 2	Location error in y direction

目标点	实际定位误差	公式算得误差	两误差的偏差
目标点1 (m)	-4.5500	-4.5254	-0.0246
目标点2 (m)	-1.6100	-1.6270	0.0170
目标点3 (m)	1.3300	1.3030	0.0270

	表 3 x方向定位误差
Tab. 3	Location error in x direction

目标点	实际定位误差	公式算得误差	两误差的偏差
目标点1 (m)	3.4980	3.4192	0.0788
目标点2 (m)	1.2034	1.0431	0.1603
目标点3 (m)	-0.4437	-0.6014	0.1577

*x*方向和*z*方向的测量误差标定结果以及标定航迹如表4所示。

图6为航迹标定示意图。由图6可以看出,利用 该测量误差标定方法可以得到非常接近真实航迹的 标定航迹。

图7为x方向航迹偏差对比图,图8为z方向航迹 偏差对比图。航迹偏差指的是各条航迹与真实航迹 之间的偏差。图7和图8表明,标定航迹与真实航迹 之间的偏差远小于测量航迹与真实航迹之间的偏 差,即证明了标定的有效性。

如图9所示,使用标定后的航迹进行成像,得 到了与目标点理想位置基本重合的成像结果,该结 果从另一角度验证了测量误差标定的有效性。

以上是针对单一子孔径的测量误差标定。对于 整条航迹,则将其分为多个子孔径,对每个子孔径 都进行上述处理。整条航迹的仿真场景如图10所示。

对各子孔径的标定结果进行拟合,可得到整条 航迹的标定结果,如图11所示。

4.3 对比实验

文献[21]对定位误差模型的推导建立在不考虑 运动误差且不进行运动补偿的基础上,本文则考虑 了运动误差并进行运动补偿。为验证本文模型方法



图 4 航迹设置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of trajectory setting



图 5 仿真场景示意图

Fig. 5 Schematic diagram of simulation scene

表 4 测量误差标定结果

Tab. 4 Calibration results of measurement error

方向	测量航迹	真实航迹	标定出的测量误差	标定航迹
x方向	$\eta^2 - 3\eta - 1$	η^2	$-3.0161\eta - 0.6755$	$\eta^2 + 0.0161\eta - 0.3245$
z方向	$\eta^2 - 3\eta + 449$	$\eta^2 + 450$	$-3.0113\eta - 0.7585$	$\eta^2 + 0.0113\eta + 449.7585$



图 6 航迹标定示意图

Fig. 6 Schematic diagram of calibration trajectory



图 7 x方向航迹偏差对比图

Fig. 7 Contrastive diagram of trajectory deviation in x direction



图 8 z方向航迹偏差对比图

Fig. 8 Contrastive diagram of trajectory deviation in z direction





Fig. 9 Imaging results using the calibration trajectory

的优越性,利用文献[21]模型和本文模型进行航迹 标定结果的比较。

对比实验结果如下,图12为标定航迹对比图, 图13为*x*方向整条航迹偏差对比图,图14为*z*方向整 条航迹偏差对比图。



图 10 仿真场景示意图





图 11 整条航迹标定结果图





图 12 标定结果对比图





图 13 x方向整条航迹偏差对比图



从实验结果可以看出,本文模型方法在各子 孔径内均能得到较好的标定结果,效果明显优于 文献[21]中不考虑运动误差和运动补偿的模型。这 是因为运动补偿通常是不完全的,由于航迹测量 误差的存在,根据测量航迹进行运动补偿必然会 导致残余运动误差,当该误差较大时,不考虑该 误差的标定模型则会表现出较差的效果。因此, 提出考虑运动补偿残余误差的定位误差模型十分 必要。

4.4 考虑定标点误差的实验

由于本文使用的是基于定标点的测量误差标定 方法,因此需要考虑实际中存在定标点误差的情况。

首先,使用差分GPS (Differential Global Positioning System, DGPS)时的定标点测量精度可以







达到0.05 m^[22]。另外,由文献[23]中的式(9)可知, 在带噪图像中提取点目标峰值时的精度与图像信杂 比具有如下关系:

$$\sigma_{\rm point} \approx \frac{0.55}{\sqrt{\rm SCR}}$$
 (33)

通过式(33)可以算出,在图像信杂比为15 dB 的情况下,从图像上提取定标点峰值时的精度为 0.55/√10^{1.5} ≈ 0.0978像素。当距离门宽度为0.5 m 时,距离向提取精度约为0.05 m;当方位向像素宽 度为0.07 m时,方位向提取精度约为0.0068 m,远 高于距离向提取精度。因此,可设定标点峰值的提 取精度约为0.05 m。

根据以上对定标点测量误差的分析,可设定标 点测量精度为0.1 m,进行标定实验。实验结果如表5 和图15-图18所示。由实验结果可以看出,此时的 定标点误差对测量误差标定结果的影响较小,与无 定标点误差时的结果相近。另外,用标定后的航迹 进行成像也可以得到与理想位置基本重合的成像结果。

表 5 测量误差标定结果 Tab. 5 Calibration results of measurement error

方向	测量航迹	真实航迹	标定出的测量误差	标定航迹
x方向	$\eta^2 - 3\eta - 1$	η^2	$-3.0161\eta - 0.2751$	$\eta^2 + 0.0161\eta - 0.7249$
<i>z</i> 方向	$\eta^2 - 3\eta + 449$	$\eta^2 + 450$	$-3.0222\eta - 0.3882$	$\eta^2 + 0.0222\eta + 449.3882$



图 15 航迹标定示意图

Fig. 15 Schematic diagram of calibration trajectory



Fig. 16 Contrastive diagram of trajectory deviation in x direction



图 17 z方向航迹偏差对比图







该实验结果说明,在合理的定标点误差范围 内,仍可以用该定标点进行有效的测量误差标定, 得到较理想的航迹标定结果。

5 结束语

本文针对实际机载SAR存在运动误差和航迹测 量误差的情况,结合一步运动补偿方法,推导出了 基于频域成像算法的定位误差传递模型。该模型阐 明了运动补偿残余误差和航迹测量误差对定位误差 的影响方式,并且提供了航迹测量误差标定的方 法。文中通过仿真实验,验证了所提出的定位误差 模型的正确性,并且证明了测量误差标定的有效 性。同时,对比实验还证明了本文所提方法优于不 考虑运动误差和运动补偿的模型,可以得到更高精 度的航迹测量误差标定结果,表明了方法的优越 性。此外,文中还对定标点测量误差进行了考虑。 本文推导的定位误差模型可为考虑运动误差时的 SAR-VIO^[21]观测模型提供重要理论基础。

参考文献

 郑波浪. 机载高分辨率合成孔径雷达运动补偿研究[D]. [硕士 论文], 中国科学院电子学研究所, 2006.
 ZHENG Bolang. A research on motion compensation of

high-resolution airborne SAR[D]. [Master dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2006.

- [2] CANTALLOUBE H M J and NAHUM C E. Airborne SARefficient signal processing for very high resolution[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(3): 784–797. doi: 10.1109/ JPROC.2012.2232891.
- [3] 苗慧. 机载SAR定位精度的研究[D]. [博士论文],中国科学院 电子学研究所, 2007.
 MIAO Hui. Research on airborne SAR geolocation accuracy[D]. [Ph. D dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [4] 高祥武,黄广民,杨汝良.机载SAR目标快速定位方法和定位 精度分析[J].现代雷达,2004,26(9):4-7.doi: 10.3969/ j.issn.1004-7859.2004.09.002.

GAO Xiangwu, HUANG Guangmin, and YANG Ruliang. Study on a fast target location method for airborne SAR and location precision analysis[J]. *Modern Radar*, 2004, 26(9): 4–7. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2004.09.002.

[5] 彭代强,林幼权,杜鹏飞.机载SAR图像快速经纬度计算及精度分析[J].现代雷达,2010,32(3):48-52,79.doi:10.3969/ j.issn.1004-7859.2010.03.013.

PENG Daiqiang, LIN Youquan, and DU Pengfei. A fast algorithm for latitude and longitude calculation of airborne SAR and its location precision analysis[J]. *Modern Radar*, 2010, 32(3): 48–52, 79. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859. 2010.03.013.

- [6] LIU Junbin, QIU Xiaolan, HUANG Lijia, et al. Curvedpath SAR geolocation error analysis based on BP algorithm[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 20337–20345. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2897361.
- XING Mengdao, JIANG Xiuwei, WU Renbiao, et al. Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2870–2883. doi: 10.1109/TGRS.2009.2015657.
- [8] DE MACEDO K A C and SCHEIBER R. Precise topography- and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 172–176. doi: 10.1109/LGRS. 2004.842465.
- [9] MAO Yongfei, XIANG Maosheng, WEI Lideng, et al. Error analysis of SAR motion compensation[C]. 2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques Proceedings, Manchester, UK, 2012: 377–380. doi: 10.1109/IST.2012.6295562.
- [10] 李芳芳, 仇晓兰, 孟大地, 等. 机载双天线InSAR运动补偿误差的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 559–567. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00850.
 LI Fangfang, QIU Xiaolan, MENG Dadi, *et al.* Effects of

LI Fangiang, QIU Alaolan, MENG Dadi, et al. Effects of motion compensation errors on performance of airborne dual-antenna InSAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(3): 559–567. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00850.

- [11] PRATS P, REIGBER A, MALLORQUI J J, et al. Efficient detection and correction of residual motion errors in airborne SAR interferometry[C]. IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, USA, 2004: 992–995. doi: 10.1109/IGARSS. 2004.1368576.
- [12] REIGBER A, PRATS P, and MALLORQUI J J. Refined estimation of time-varying baseline errors in airborne SAR interferometry[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(1): 145–149. doi: 10.1109/LGRS.2005. 860482.
- [13] 刘云龙,李焱磊,周良将,等.一种机载SAR快速几何精校正算
 法[J]. 雷达学报,2016,5(4):419-424. doi: 10.12000/ JR16064.

LIU Yunlong, LI Yanlei, ZHOU Liangjiang, *et al.* A fast precise geometric calibration method for airborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(4): 419–424. doi: 10.12000/JR16064.

[14] REIGBER A, ALIVIZATOS E, POTSIS A, et al. Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation[J]. *IEE Proceedings-Radar*, *Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 301–310. doi: 10.1049/ip-rsn:20045087.

- [15] MOREIRA A, MITTERMAYER J, and SCHEIBER R. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123–1136. doi: 10.1109/36.536528.
- [16] 孟大地. 机载合成孔径雷达运动补偿算法研究[D]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2006.
 MENG Dadi. Research on motion compensation algorithm for airborne SAR[D]. [Ph. D dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [17] YANG Mingdong, ZHU Daiyin, and SONG Wei. Comparison of two-step and one-step motion compensation algorithms for airborne synthetic aperture radar[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(14): 1108–1110. doi: 10.1049/ el.2015.1350.
- [18] FORNARO G, FRANCESCHETTI G, and PERNA S. On center-beam approximation in SAR motion compensation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(2): 276–280. doi: 10.1109/LGRS.2005.863391.
- [19] 曾乐天,邢孟道,陈士超.基于窄波束和平地假设的运动补偿 方向研究[J].电子与信息学报,2014,36(10):2464-2468.doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01671.

ZENG Letian, XING Mengdao, and CHEN Shichao. The research on the direction of motion compensation according to the narrow beam and flat earth hypothesis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10):



作者简介

高 铭(1997–),女,山西忻州人,中国 科学院空天信息创新研究院在读博士, 研究方向为机载SAR信号处理。



仇晓兰(1982-),女,江苏苏州人,中国 科学院空天信息创新研究院研究员,博 士生导师,IEEE高级会员、IEEE地球 科学与遥感快报副主编、雷达学报青年 编委。主要研究方向为SAR成像处理、 SAR图像理解。



孟大地(1979-),男,陕西西安人,博 士,中国科学院空天信息创新研究院研 究员,硕士生导师,研究方向为合成孔 径雷达信号处理。 2464–2468. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01671.

[20] 杨鸣冬,俞翔,朱岱寅.基于距离子带的机载SAR高精度多级 空变运动补偿[J]. 航空学报, 2018, 39(2): 321557. doi: 10.7527/S1000-6893.2017.21557.

YANG Mingdong, YU Xiang, and ZHU Daiyin. Highprecision space-variant motion compensation with multilevel processing for airborne SAR based on subswath[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(2): 321557. doi: 10.7527/S1000-6893.2017.21557.

- [21] 柳俊斌. 弱导航信息下的SAR自主定位与航迹修正技术研究[D]. [硕士论文], 中国科学院空天信息创新研究院, 2020. LIU Junbin. Research on SAR autonomous positioning and track correction technology under weak navigation information[D]. [Master dissertation], Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [22] 孙立军,刘鑫,刘兴春.关于差分GPS精度的分析[C].第十届 东北三省测绘学术与信息交流会论文集,漠河,2009.
 SUN Lijun, LIU Xin, and LIU Xingchun. Analysis on the accuracy of differential GPS-DGPS[C]. The 10th Academic and Information Exchange Meeting of Surveying and Mapping in Northeast China, Mohe, China, 2009.
- [23] BAMLER R and EINEDER M. Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 151–155. doi: 10.1109/LGRS.2004.843203.



黄丽佳(1984-),女,山东莱州人,博 士,中国科学院空天信息创新研究院研 究员,硕士生导师,研究方向为合成孔 径雷达信号处理与图像分析。



丁赤飚(1969-),男,山西原平人,研究 员,博士生导师,先后主持多项国家重 点项目和国家级遥感卫星地面系统工程 建设等项目,曾获国家科技进步奖一等 奖、二等奖,国家发明奖二等奖等奖 励。研究方向为合成孔径雷达、遥感信

息处理和应用系统等。