

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} 丁赤飏^{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

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

GAO Ming^{①②③} QIU Xiaolan^{*①②} MENG Dadi^{①②}
HUANG Lijia^{①②} DING Chibiao^{①②③}

^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)

责任编辑: 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。

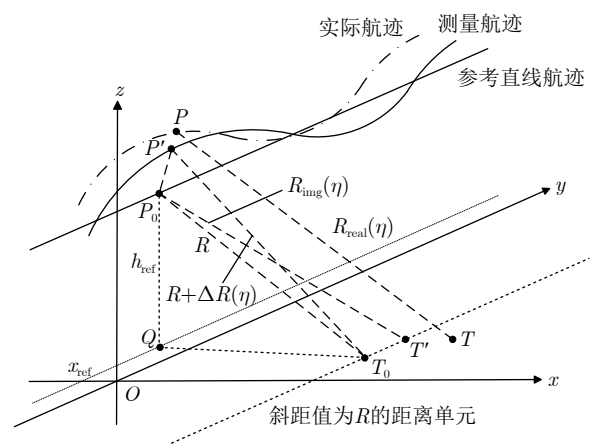


图1 机载SAR几何关系

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, P_0 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; T_0 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:

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

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, $R_{\text{real}}(\eta)$ 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] $\Delta R(\eta)$ 。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

$$\Phi_R = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(\eta) \quad (2)$$

其中, $\Delta R(\eta)$ 如下:

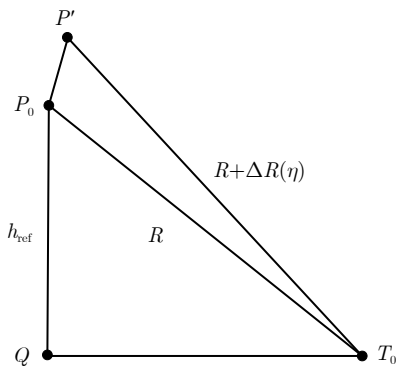


图 2 跨航迹平面内的SAR几何关系

Fig. 2 SAR geometric relationship in the cross-track plane

$$\Delta R(\eta) = R_m(\eta) - R_{\text{ref}}(\eta) \approx (z_m(\eta) - h_{\text{ref}}) \frac{h_{\text{ref}}}{R} - (x_m(\eta) - x_{\text{ref}}) \frac{\sqrt{R^2 - h_{\text{ref}}^2}}{R} \quad (3)$$

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

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

其中

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

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 $R_{\text{img}}(\eta)$, 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 $R_{\text{moco}}(\eta)$ 是匹配的, 即

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

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 c_1, d_1 和位置偏移 c_0, d_0 :

$$[c_1\eta + c_0 \quad 0 \quad d_1\eta + d_0] \quad (7)$$

子孔径内的测量航迹用二次多项式表示为

$$[x_m(\eta) \quad y_m(\eta) \quad z_m(\eta)] \quad (8)$$

其中

$$x_m(\eta) = a_2\eta^2 + a_1\eta + x_{\text{ref}} \quad (9)$$

$$y_m(\eta) = v\eta + y_{\text{ref}} \quad (10)$$

$$z_m(\eta) = b_2\eta^2 + b_1\eta + h_{\text{ref}} \quad (11)$$

a_2 和 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 和 b_1 为一次项系数, $x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}}$ 和 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

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

其中

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

$$y_{\text{real}}(\eta) = v\eta + y_{\text{ref}} \quad (14)$$

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

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

$$[x_{\text{ref}} \quad v\eta + y_{\text{ref}} \quad h_{\text{ref}}] \quad (16)$$

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：

$$[a_2\eta^2 + a_1\eta \quad 0 \quad b_2\eta^2 + b_1\eta] \quad (17)$$

利用该误差计算视线方向误差：

将式(19)进行泰勒展开可得

$$R_{\text{real}}(\eta) = \sqrt{(a_2\eta^2 + a_1\eta + x_{\text{ref}} - c_1\eta - c_0 - x_0)^2 + (v\eta + y_{\text{ref}} - y_0)^2 + (b_2\eta^2 + b_1\eta + h_{\text{ref}} - d_1\eta - d_0)^2}$$

$$\approx M(\eta) + \frac{-X(a_2\eta^2 + a_1\eta - c_1\eta) + Z(b_2\eta^2 + b_1\eta - d_1\eta)}{M(\eta)} \quad (24)$$

又设变量 N 为

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

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

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

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

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

参考直线航迹和成像点之间的距离历程为

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

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

$$R_{\text{img}}(\eta) \approx M(\eta) + \frac{X(\Delta x - c_0) + (Y - v\eta)\Delta y + Zd_0}{M(\eta)} + \frac{(Y^2 + Z^2)(\Delta x - c_0)^2 + (X^2 + Y^2)d_0^2 + (X^2 + Z^2)\Delta y^2}{2N^2M(\eta)}$$

$$- \frac{XY(\Delta x - c_0)\Delta y + XZ(\Delta x - c_0)d_0 + YZ\Delta yd_0}{N^2M(\eta)} \quad (28)$$

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。

$$\Delta R(\eta) \approx (b_2\eta^2 + b_1\eta) \frac{h_{\text{ref}}}{R}$$

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

设地面目标点 $P = [x_0 \quad y_0 \quad 0]$ ，其对应的成像点 $P' = [x_0 + \Delta x \quad y_0 + \Delta y \quad 0]$ ， 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

$$R_{\text{real}}(\eta)$$

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

设

$$X = x_0 + c_0 - x_{\text{ref}} \quad (20)$$

$$Y = y_0 - y_{\text{ref}} \quad (21)$$

$$Z = h_{\text{ref}} - d_0 \quad (22)$$

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

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

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

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

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

设变量 K 为

$$K = Y^2 + Z^2 \quad (31)$$

整理式(30)可得定位误差 Δx 的表达式为

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

从式(32)可以看出, 定位误差 Δx 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 $[x_1 \ y_1], [x_2 \ y_2], [x_3 \ y_3] \dots$ 代替式(30)中的 $[x_0 \ y_0]$ 建立 m 个等式。在这组等式中, 除 c_0 和 d_0 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 c_0 和 d_0 。

将得到的 c_0 和 d_0 代入式(29), 并且也用各目标点坐标 $[x_1 \ y_1], [x_2 \ y_2], [x_3 \ y_3] \dots$ 代替式(29)中的

$[x_0 \ y_0]$ 建立 m 个等式。在这组等式中, 除 c_1 和 d_1 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 c_1 和 d_1 。

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。

表 1 定位误差仿真参数
Tab. 1 Simulation parameters of location error

参数	数值
载波频率(GHz)	30
信号带宽(MHz)	200
脉冲持续时间(μ s)	1
脉冲重复频率(Hz)	1000
方位向天线尺寸(m)	2
平台速度(m/s)	70
斜视角($^\circ$)	0
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)

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。

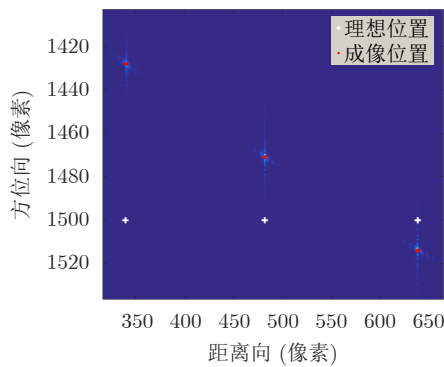


图3 成像结果图

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

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	$\eta^2 - 3\eta + 449$	$\eta^2 + 450$	$-3.0113\eta - 0.7585$	$\eta^2 + 0.0113\eta + 449.7585$

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

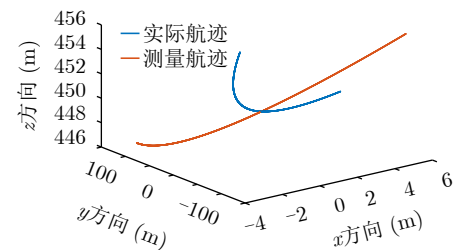


图4 航迹设置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of trajectory setting

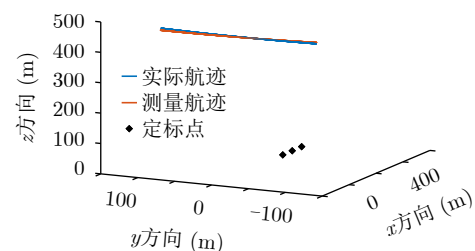


图5 仿真场景示意图

Fig. 5 Schematic diagram of simulation scene

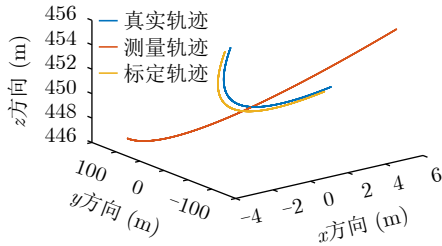


图 6 航迹标定示意图

Fig. 6 Schematic diagram of calibration trajectory

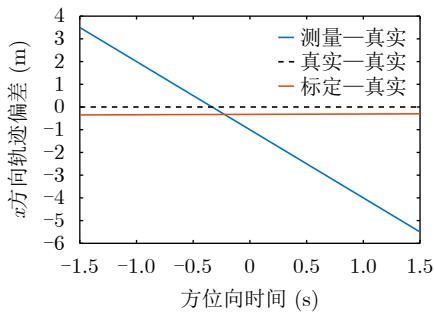


图 7 x方向航迹偏差对比图

Fig. 7 Contrastive diagram of trajectory deviation in x direction

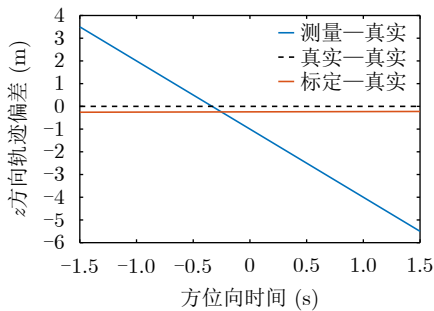


图 8 z方向航迹偏差对比图

Fig. 8 Contrastive diagram of trajectory deviation in z direction

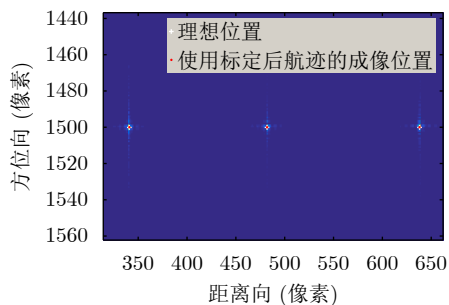


图 9 使用标定航迹的成像结果

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。

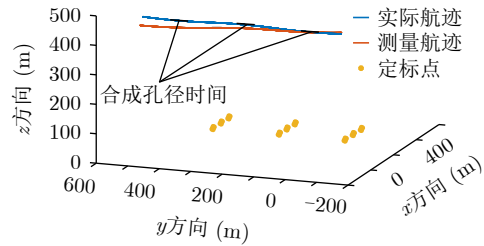


图 10 仿真场景示意图

Fig. 10 Schematic diagram of simulation scene

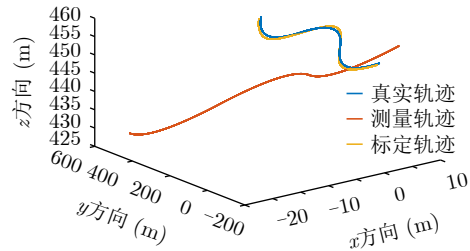


图 11 整条航迹标定结果图

Fig. 11 Calibration result of the whole trajectory

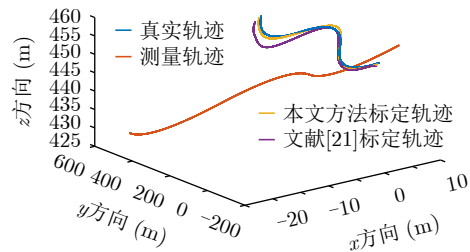


图 12 标定结果对比图

Fig. 12 Contrastive diagram of calibration results

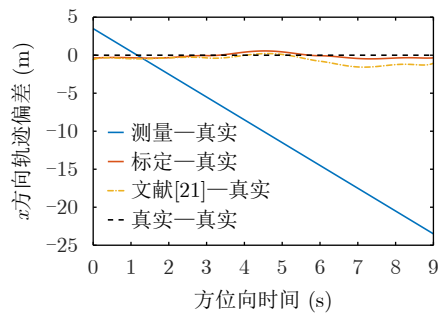


图 13 x方向整条航迹偏差对比图

Fig. 13 Contrastive diagram of deviation of the whole trajectory in x direction

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：

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

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 $0.55/\sqrt{10^{1.5}} \approx 0.0978$ 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。

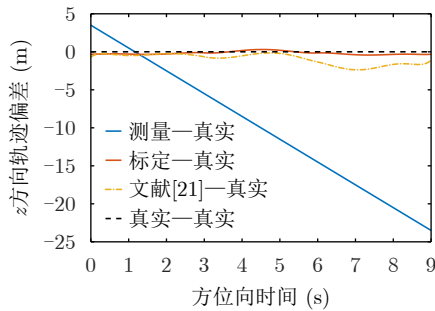


图 14 z方向整条航迹偏差对比图

Fig. 14 Contrastive diagram of deviation of the whole trajectory in z direction

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	$-3.0161\eta - 0.2751$	$\eta^2 + 0.0161\eta - 0.7249$
z方向	$\eta^2 - 3\eta + 449$	$\eta^2 + 450$	$-3.0222\eta - 0.3882$	$\eta^2 + 0.0222\eta + 449.3882$

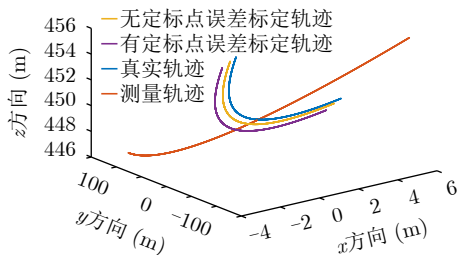


图 15 航迹标定示意图

Fig. 15 Schematic diagram of calibration trajectory

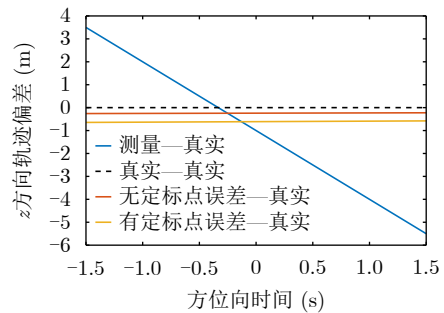


图 17 z方向航迹偏差对比图

Fig. 17 Contrastive diagram of trajectory deviation in z direction

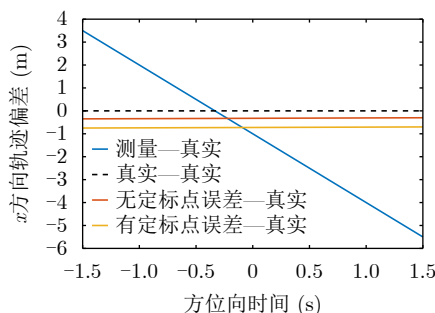


图 16 x方向航迹偏差对比图

Fig. 16 Contrastive diagram of trajectory deviation in x direction

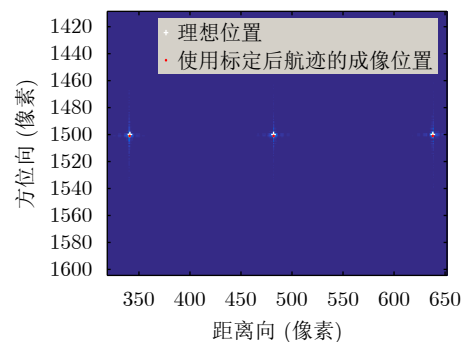


图 18 使用标定航迹的成像结果

Fig. 18 Imaging results using the calibration trajectory

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

- [1] 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 SAR-efficient signal processing for very high resolution[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(3): 784–797. doi: [10.1109/JPROC.2012.2232891](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2010.03.013).
- [6] LIU Junbin, QIU Xiaolan, HUANG Lijia, *et al.* Curved-path SAR geolocation error analysis based on BP algorithm[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 20337–20345. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2897361](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897361).
- [7] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00850).
LI Fangfang, QIU Xiaolan, 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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]. [博士学位文], 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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): 2464–2468. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01671](https://doi.org/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](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2017.21557).
YANG Mingdong, YU Xiang, and ZHU Daiyin. High-precision space-variant motion compensation with multi-level processing for airborne SAR based on subswath[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(2): 321557. doi: [10.7527/S1000-6893.2017.21557](https://doi.org/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]. [硕士学位论文], 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](https://doi.org/10.1109/LGRS.2004.843203).

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。



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。



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。



丁赤飏(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。



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。