

文章编号:1004-9037(2014)04-0555-07

机载聚束 SAR 图像定位精度研究

宋 伟^{1,2} 朱岱寅¹ 李 勇¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016; 2. 中国航空工业雷华电子技术研究所, 无锡, 214063)

摘要:根据机载聚束 SAR 成像几何关系及线性 RD 成像算法,对 SAR 图像的定位精度进行了深入探讨。由于现有的惯性导航系统大多精度不高,并不能准确提供载机的真实运动信息,利用这些参数进行成像处理会使目标偏离真实位置。本文主要分析惯性导航系统提供的载机飞行参数对机载 SAR 定位精度的影响,建立定位方程并推导出定位误差解析公式。最后对机载 SAR 图像定位精度进行仿真分析与实测数据处理验证,处理结果表明载机的视线方向的速度误差和载机的位置误差是影响 SAR 图像定位精度主要因素。

关键词:合成孔径雷达;定位;线性 RD

中图分类号:TN957 **文献标志码:**A

Airborne Spotlight SAR Geolocation Accuracy

Song Wei^{1,2}, Zhu Daiyin¹, Li Yong¹

(1. College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. Leihua Electronic Technology Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Wuxi, 214063, China)

Abstract: From the principle of linear RD algorithm and model of airborne spotlight SAR, this paper studies airborne spotlight SAR geolocation accuracy. Firstly, the effect of the radar parameters on the airborne SAR geolocation accuracy is analyzed, and these parameters are mostly platform motion errors from the onboard GPS and INS devices. Then, the formulas of airborne spotlight SAR geolocation errors are given. Finally, simulation results and experimental results using the data collected by an experimental airborne SAR are employed to verify the proposed analysis approach. This paper provides useful reference for the design of the geolocation accuracy of airborne SAR system.

Key words: synthetic aperture radar(SAR); geolocation; linear RD algorithm

引 言

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)是一种全天候、全天时、高分辨率的微波成像雷达,能够实时提供地面区域的高分辨率图像。在军事侦察中,需要对感兴趣的军事目标进行精确定位,在民用地图测绘中,同样需要对地物进行精确测量。目前机载 SAR 图像定位精度已经成为机载 SAR 系统的一项重要技术指标。机载 SAR 图像

定位是在无地面参考点的情况下,应用飞机惯性导航系统提供的参数,计算图像中任意一个目标的经纬度。机载 SAR 对目标精确定位主要依赖载机航迹的准确性。

文献[1]结合几何关系和惯性导航系统简要分析了机载 SAR 在正侧视和斜视情况下的图像定位精度。文献[2]研究了机载条带 SAR 图像的定位精度,仅仅分析了载机的高度、航向角以及载机经纬度误差等参数影响 SAR 图像绝对定位精度。文献[3]研究了载机运动误差对机载 SAR 图像定位

精度的影响,指出距离向速度误差是影响定位的主要因素,但是并没有结合惯导参数分析 SAR 图像定位精度。文献[4]通过联立求解等距离方程和等多普勒方程,提出了一种新的图像无参考点几何校正和像素点定位的距离-多普勒算法,这种定位仅适用于相对定位。文献[5]和文献[6]仅仅利用成像几何关系分析了 SAR 定位精度,给出了定位误差的解析公式,另外文献[7]针对机载 SAR 存在斜距测量误差和航迹不稳定的特点,提出了一种利用少量控制点修正斜距测量误差的间接定位算法。文献[8]提出一种具有解析解的星载 SAR 图像地面目标定位方法,避免了距离-多普勒直接定位法求解困难的问题。

本文在不考虑地形起伏情况下,从线性 RD 成像算法的角度分析惯性导航系统提供的载机飞行参数对图像定位精度的影响。惯性导航系统提供的载机飞行参数主要包括载机东北天三向速度和载机东北天三向位置。本文工作主要包括对机载 SAR 图像定位误差进行分析,在此基础上给出定位误差解析公式,给出图像中任意点的经纬度计算流程,最后对机载 SAR 图像定位精度进行仿真分析和并给出实测数据处理结果。

1 SAR 图像定位误差分析

1.1 线性 RD 成像原理

本文利用线性 RD 成像算法^[9]分析机载 SAR 数据,首先利用惯性导航系统提供的参数产生参考信号对雷达回波信号进行补偿,然后经过两维傅里叶变换产生高分辨率 SAR 图像,最后以场景中心为参考点对图像进行几何失真校正。经过线性 RD 算法成像后,场景中心点能够得到完全聚焦。线性 RD 成像算法计算量小、处理流程简单,尤其适合进行中等分辨率大斜视实时成像。

在东北天三维坐标系中,成像场景位于东-北平面内,假设载机以地速 v_a 水平匀速从 A 飞行到 B 点,其中 C 点为合成孔径中心点,雷达视线方向地面投影为 x 轴。 θ 和 ϕ 分别为天线相位中心在合成孔径中心时刻的斜视角和俯仰角, h 为载机飞行高度。点 $p(x, y)$ 为成像场景中任意一点。成像几何坐标系如图 1 所示。

载机在合成孔径中心坐标为

$$\begin{cases} X_0 = h \tan \phi \\ Y_0 = 0 \\ Z_0 = h \end{cases} \quad (1)$$

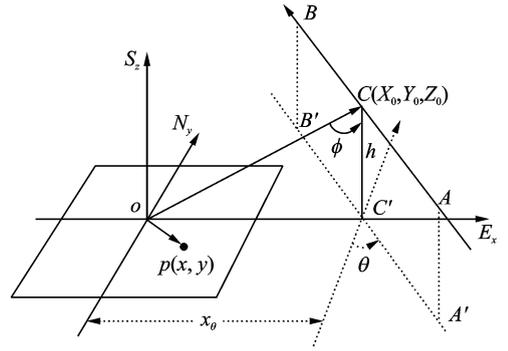


图 1 东北天坐标系中的成像几何关系

Fig. 1 Geometric model of the northeast sky coordinate system

载机的理想航迹可以表示为

$$\begin{cases} X = X_0 + v_x t \\ Y = Y_0 + v_y t \\ Z = Z_0 + v_z t \end{cases} \quad (2)$$

式中 $v_x = v_a \sin \theta$, $v_y = v_a \cos \theta$, $v_z = 0$ 分别为载机的东北天三向速度。

雷达天线相位中心到选取的场景中心 O 点的瞬时距离为

$$r_0(t) = \sqrt{(X_0 + v_x t)^2 + (Y_0 + v_y t)^2 + (Z_0 + v_z t)^2} \quad (3)$$

根据载机理想航迹产生的参考信号为

$$s_0(\tau, t) = m\left(\tau - \frac{2r_0(t)}{c}\right) \exp\left\{jk\left(\tau - \frac{2r_0(t)}{c}\right)\right\} \exp\left\{-j \frac{4\pi r_0(t)}{\lambda}\right\} \quad (4)$$

式中: $m(\tau)$ 为矩形包络, k 为发射信号的调频斜率, c 为光速, λ 为雷达的波长。

经过成像处理后,场景中心点 O 点的多普勒相位被补偿为固定相位,所以被聚焦在图像中心,可以求得该点对应的标称距离及多普勒频率分别为

$$\begin{cases} r_0(t) |_{t=0} = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2} \\ f_d = -\frac{2}{\lambda} \times \frac{dr_0(t)}{dt} |_{t=0} = -\frac{2}{\lambda} \times \frac{2X_0 v_x + 2Y_0 v_y + 2Z_0 v_z}{\sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}} \end{cases} \quad (5)$$

1.2 定位误差解析式

载机实际飞行中总会受到气流等各种因素影响而使其偏离理想航迹。由于惯性导航系统的精度不高并不能提供载机的真实运动信息,所以经过线性 RD 算法成像后,目标点偏离真实位置并且有一定的散焦,目标的散焦可以通过自聚焦等后处理

改善聚焦效果,本文主要分析 SAR 的定位精度,因此不考虑目标的散焦。为分析方便,现在假设载机沿着非理想航迹运动,惯性导航系统提供的是理想航迹参数。经分析可以知道影响 SAR 定位精度主要有雷达作用距离、斜视角、东北天三向速度和载机东北天三向位置。设 Δv_x 为东向速度误差, Δv_y 为北向速度误差, Δv_z 为天向速度误差(向上为正), Δh 为载机在孔径中心时刻天向位置误差, ΔX_0 为载机在孔径中心时刻东向的位置误差, ΔY_0 为载机在孔径中心时刻北向的位置误差。

载机在非理想航迹中合成孔径中心的坐标为

$$\begin{cases} \bar{X}_0 = h \tan \phi + \Delta X_0 \\ \bar{Y}_0 = \Delta Y_0 \\ \bar{Z}_0 = h + \Delta h \end{cases} \quad (6)$$

载机在非理想航迹中雷达天线的瞬时坐标为

$$\begin{cases} \bar{X} = \bar{X}_0 + (v_x + \Delta v_x)t \\ \bar{Y} = \bar{Y}_0 + (v_y + \Delta v_y)t \\ \bar{Z} = \bar{Z}_0 + (v_z + \Delta v_z)t \end{cases} \quad (7)$$

假定场景中有某一点 $p(x, y)$, 雷达天线相位中心到 p 点的瞬时距离为

$$r_p(t) = \sqrt{(\bar{X}_0 + (v_x + \Delta v_x)t - x)^2 + (\bar{Y}_0 + (v_y + \Delta v_y)t - y)^2 + (\bar{Z}_0 + (v_z + \Delta v_z)t)^2} \quad (8)$$

此点在雷达回波信号中的相位为 $s_p(\tau, t)$, 如果 $s_p(\tau, t) = s_0(\tau, t)$, 那么 p 点经过成像后相位补偿为固定相位因此被定位在图像中心。则

$$\begin{cases} r_p(t)|_{t=0} = r_0(t)|_{t=0} \\ f_d = -\frac{2}{\lambda} \times \frac{dr_0(t)}{dt} \Big|_{t=0} = f_p = -\frac{2}{\lambda} \times \frac{dr_p(t)}{dt} \Big|_{t=0} \end{cases} \quad (9)$$

即

$$\begin{cases} \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2} = \sqrt{(\bar{X}_0 - x)^2 + (\bar{Y}_0 - y)^2 + \bar{Z}_0^2} \\ X_0 v_x + Y_0 v_y + Z_0 v_z = (\bar{X}_0 - x)(v_x + \Delta v_x) + (\bar{Y}_0 - y)(v_y + \Delta v_y) + \bar{Z}_0(v_z + \Delta v_z) \end{cases} \quad (10)$$

在没有运动参数误差情况下,场景中心点 O 点被聚焦在图像中心点,在引入运动误差后场景中 p 点被聚焦在图像中心点,所以可以认为 OP 两点之间的距离为 SAR 图像定位误差。在成像过程中采用几何失真校正算法校正了 SAR 图像内部的几何畸变,因此近似认为图像内部所有像素点的定位精度相同。式(10)是关于变量 x, y 的二元方程组,可以解出 SAR 图像定位误差为

$$\Delta r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (11)$$

其中的中间变量定义如下

$$x = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (12)$$

$$y = \frac{m - x(v_x + \Delta v_x)}{v_y + \Delta v_y} \quad (13)$$

$$a = 1 + \frac{(v_x + \Delta v_x)^2}{(v_y + \Delta v_y)^2} \quad (14)$$

$$b = -\frac{2m(v_x + \Delta v_x)}{v_y + \Delta v_y} + \frac{2\bar{Y}_0(v_x + \Delta v_x)}{v_y + \Delta v_y} - 2\bar{X}_0 \quad (15)$$

$$c = \frac{m^2}{(v_y + \Delta v_y)^2} - \frac{2\bar{Y}_0 m}{v_y + \Delta v_y} + \bar{R}_0^2 - R_0^2 \quad (16)$$

$$m = \bar{X}_0(v_x + \Delta v_x) + \bar{Y}_0(v_y + \Delta v_y) + \bar{Z}_0 \Delta v_z - X_0 v_x \quad (17)$$

$$R_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2} \quad (18)$$

$$\bar{R}_0 = \sqrt{\bar{X}_0^2 + \bar{Y}_0^2 + \bar{Z}_0^2} \quad (19)$$

1.3 定位误差分析

从聚束成像原理可以知道,成像参考点可以在场景中任意选取并不影响聚焦。成像中所用的雷达作用距离和斜视角这两个量是根据所选择的参考点决定的,所以对于同一组数据来说可以近似认为雷达作用距离和斜视角不影响 SAR 图像定位精度。下面主要分析载机东北天三个方向的位置和速度对定位精度的影响。

1.3.1 载机东和北方向位置误差

当载机东北天三向速度误差及天向位置(高度)误差为零时,此时载机的运动参数中只有东和北方向位置存在误差。式(10)可以化简为

$$\begin{cases} X_0 v_x + Y_0 v_y = (X_0 + \Delta X_0 - x)v_x + (Y_0 + \Delta Y_0 - y)v_y \\ X_0^2 + Y_0^2 = (X_0 + \Delta X_0 - x)^2 + (Y_0 + \Delta Y_0 - y)^2 \end{cases} \quad (20)$$

即 $\begin{cases} x = \Delta X_0 \\ y = \Delta Y_0 \end{cases}$ 。因此,载机在东和北方向上的位置误差对 SAR 图像定位精度影响相当于坐标平移,定位误差为 $\Delta r = \sqrt{\Delta X_0^2 + \Delta Y_0^2}$ 。

1.3.2 载机高度误差

当载机东北天三向速度误差及东北方向位置误差为零时,此时载机的运动参数中只有载机高度存在误差。式(10)可以化简为

$$\begin{cases} (h \tan \phi)^2 + h^2 = (h \tan \phi - x)^2 + y^2 + (h + \Delta h)^2 \\ x \sin \theta + y \cos \theta = 0 \end{cases} \quad (21)$$

从式(21)中可以解出定位误差为

$$\Delta r = h \tan \phi \times \cos \theta - \sqrt{(h \tan \phi \times \cos \theta)^2 - \Delta h^2 - 2h\Delta h} \quad (22)$$

由解析公式可以画出载机高度误差对 SAR 图像定位误差的影响曲线。仿真雷达参数分别为作用距离 50 km, 载机高度 7 155 m, 地速为 130.8 m/s, 斜视角为 31.7°, 仿真结果如图 2 所示。

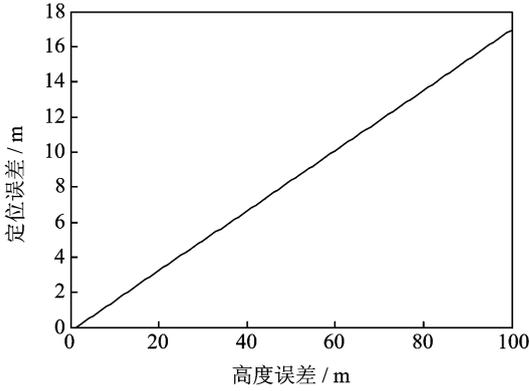


图 2 载机高度误差对 SAR 图像定位误差影响曲线
Fig. 2 SAR location error curve from platform height error

从图 2 的结果可以看出载机高度误差对 SAR 图像定位的影响程度, 在高度误差为 40 m 时, 仅由高度误差影响的定位误差约为 7 m, 因此高度误差不是影响定位误差的主要因素。

1.3.3 载机东北向速度误差

当载机的北和天方向速度误差及东北天三向位置误差为零时, 式(10)可以化简为

$$\begin{cases} x^2 - 2xh \tan \phi + y^2 = 0 \\ h \tan \phi v_a \sin \theta = (h \tan \phi - x)(v_a \sin \theta + \Delta v_x) - y v_a \cos \theta \end{cases} \quad (23)$$

从式(23)中可以解出定位误差公式约为

$$\Delta r \approx \frac{h \tan \phi}{v_a \cos \theta} \times \Delta v_x \quad (24)$$

由式(24)可以画出载机东向速度误差对 SAR 图像定位误差的影响曲线。仿真雷达参数分别为作用距离 50 km, 载机高度 7 155 m, 地速为 130.8 m/s, 斜视角为 31.7°, 仿真结果如图 3 所示。

当载机东和天方向速度误差及东北天三向位置误差为零时, 式(10)可以化简为

$$\begin{cases} x^2 - 2xh \tan \phi + y^2 = 0 \\ y(v_a \cos \theta + \Delta v_y) = x v_a \sin \theta \end{cases} \quad (25)$$

从式(25)中可以解出定位误差公式为: $\Delta r \approx 0$ 。由如图 2 所示的坐标系可知波束视线方向地面投影为 x 轴, 因此载机东向速度近似为载机径向速度, 载机北向速度近似为载机切向速度。从式(24,25)和图 3 可以看出, 当径向速度误差为

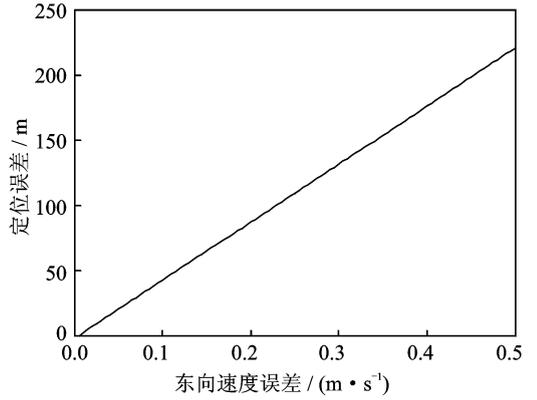


图 3 载机径向速度误差对图像定位误差的影响
Fig. 3 SAR location error curve from platform sky velocity error

0.2 m/s 时, 仅由径向速度误差影响的定位误差约为 85 m, 因此径向速度误差是影响 SAR 图像定位精度的主要因素, 切向速度误差对 SAR 图像定位精度影响很小可以忽略不计。

1.3.4 载机天方向速度误差

当载机北和东方向速度误差及东北天三向位置误差为零时, 式(10)可以化简为

$$\begin{cases} (h \tan \phi)^2 = (h \tan \phi - x)^2 + y^2 \\ x v_a \sin \theta + y v_a \cos \theta = h \Delta v_z \end{cases} \quad (26)$$

从式(26)中可以解出定位误差公式为 $\Delta r = \sqrt{x^2 + y^2}$, 其中

$$\begin{aligned} x &= \frac{h(-v_a \tan \phi \sin 2\theta + 2\Delta v_z \cos \theta) \sin 2\theta - 2h\Delta v_z}{v_a \sin \theta} \\ &= \frac{h \sin 2\theta \sqrt{(v_a \cos \theta \tan \phi)^2 + 2v_a \Delta v_z \sin \theta \tan \phi - \Delta v_z^2}}{v_a \sin \theta} \\ y &= \frac{h(-v_a \cos \theta \tan \phi \sin \theta + \Delta v_z \cos \theta)}{v_a} \\ &= \frac{h \sin \theta \sqrt{(v_a \cos \theta \tan \phi)^2 + 2v_a \Delta v_z \sin \theta \tan \phi - \Delta v_z^2}}{v_a} \end{aligned}$$

由式(26)可以画出载机天向速度误差对 SAR 图像定位误差的影响曲线。仿真雷达参数分别为作用距离 50 km, 载机高度 7 155 m, 地速为 130.8 m/s, 斜视角为 31.7°, 仿真结果如图 4 所示。从图 4 可以看出当载机在天向速度误差为 0.2 m/s 时, 仅由天向速度误差影响的定位误差约为 13 m, 因此天向速度误差不是影响 SAR 图像定位误差的主要因素。

2 图像中任意点经纬度计算

取载机合成孔径中心点 C 为东北天坐标系的原点, C 点的纬度为 B_0 , 经度为 L_0 , 海拔高度为 H_0 。根据成像几何关系, 可以计算得到 SAR 图像中定标点在东北天坐标系中的坐标 (x, y, z) 。由

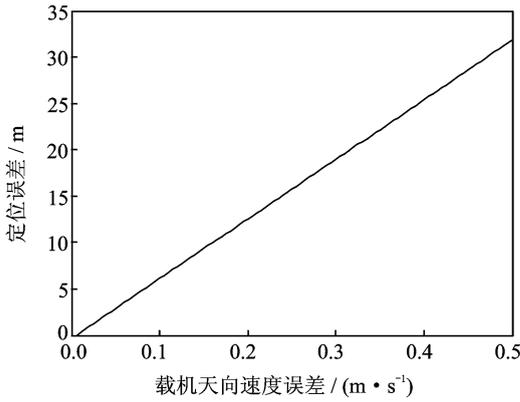


图 4 载机天向速度误差对图像定位误差的影响

Fig. 4 SAR location error curve from platform radial velocity error

东北天坐标系到球心直角坐标系转换及球心直角坐标系到经纬度坐标转换关系,可以解算出该定标点的经纬度。地球偏心率^[10]

$$e = \frac{R_e^2 - R_p^2}{R_e^2} \quad (27)$$

其中地球长和短半径分别取^[10]: $R_e = 6\,378\,137\text{ m}$,
 $R_p = 6\,356\,752\text{ m}$ 。

地面点到地球球心的距离

$$N = \frac{R_e}{\sqrt{1 - e^2 (\sin B_0)^2}} \quad (28)$$

东北天坐标系到球心直角坐标系转换公式为

$$\begin{bmatrix} -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ -\sin B_0 \cos L_0 & -\sin B_0 \sin L_0 & \cos B_0 \\ \cos B_0 \cos L_0 & \cos B_0 \sin L_0 & \sin B_0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

其中 (X_0, Y_0, Z_0) 为东北天坐标原点 C 在球心直角坐标系中的坐标, (X, Y, Z) 为定标点在球心直角坐标系中的坐标。

$$\begin{cases} X_0 = (N + H_0) \cos B_0 \cos L_0 \\ Y_0 = (N + H_0) \cos B_0 \sin L_0 \\ Z_0 = [N(1 - e^2) + H_0] \sin B_0 \end{cases} \quad (30)$$

球心直角坐标系到经纬度转换关系为

$$L = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (31)$$

$$B = \arctan\left\{\frac{Z(N + H)}{\sqrt{X^2 + Y^2} [N(1 - e^2) + H]}\right\} \quad (32)$$

$$H = \frac{Z}{\sin B} - N(1 - e^2) \quad (33)$$

其中: L 为定标点的经度, B 为定标点的纬度, H 为定标点的海拔高度。

图像中任意点目标经纬度计算流程如图 5 所示。

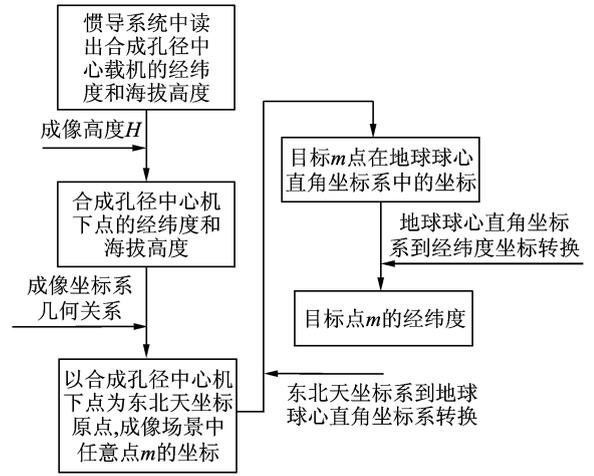


图 5 图像中任意点经纬度计算流程图

Fig. 5 Diagram of calculating latitude and longitude of arbitrary point in the image

3 仿真与实测数据结果

为验证惯性导航系统提供的参数误差对 SAR 图像定位精度的影响,本文对 SAR 图像定位误差做了数据仿真分析。惯性导航系统提供的参数误差是参照现有惯性导航系统的精度水平,仿真雷达参数分别为作用距离 50 km,载机高度 7 155 m,地速为 130.8 m/s。仿真结果见表 1 所示,表 1 中的变量定义同 1.2 节。表 1 分别给出正侧视和大斜视情况,惯性导航系统提供的参数误差取两个等级。

表 1 SAR 定位误差仿真结果

Table 1 Simulation results of SAR location error

$\theta/$ (°)	$\Delta v_x/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\Delta v_y/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\Delta v_z/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\Delta h/$ m	$\Delta X_0/$ m	$\Delta Y_0/$ m	$\Delta r/$ m
0	0.1	0.1	0.1	10	10	10	54.49
0	0.5	0.5	0.5	30	20	20	237.08
31.7	0.1	0.1	0.1	10	10	10	62.82
31.7	0.5	0.5	0.5	30	20	20	277.66

最后本文对机载聚束 SAR 实测数据进行处理。雷达工作在 X 波段,系统带宽为 450 MHz,作用距离 50 km,载机高度 7 155 m,斜视角为 31.7°,地速为 130.8 m/s。在成像场景中摆放 A 和 B 两个角反射器作为地面定标点,其中 A 点位于图像中心区域,B 点位于图像边缘区域。图 6 和图 7 分别给出了定标点 A 和 B 所在区域的 SAR 图像。

根据 GPS 系统可以测得这两个定标点的经纬

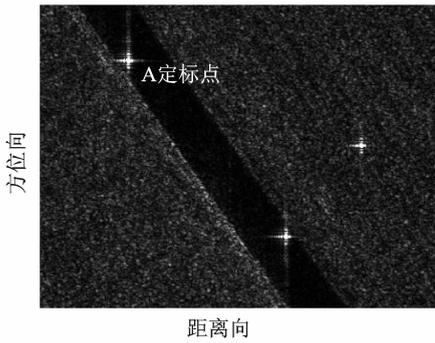


图 6 定标点 A 所在区域的 SAR 图像

Fig. 6 SAR image of the scaling point A

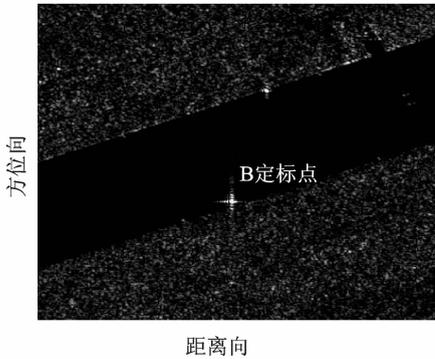


图 7 定标点 B 所在区域的 SAR 图像

Fig. 7 SAR image of the scaling point B

度。机载 SAR 系统对该区域聚束成像,由 A 和 B 两个定标点在图像中的位置及成像几何关系按照图 5 的计算流程可以计算出 A 和 B 两个定标点的经纬度,计算得到的定标点经纬度与 GPS 测量的定标点经纬度的差异可以认为是 SAR 图像定位误差。定标点 A 和定标点 B 分别位于图像的中心区域和边缘区域,从表 2 中可以看出这两个点的定位误差基本相等,可见整幅 SAR 图像中各个像素点的定位误差是近似相同的。实测数据定位结果如表 2 所示。

表 2 实测数据 SAR 定位结果

Table 2 The location results of measured data

	经度	纬度	定位误差 $\Delta r/m$
地面定标点 A	109°15'4.439 8"	34°39'5.835 2"	276.97
SAR 定位结果	109°14'58.735 602"	34°39'13.481 262"	
地面定标点 B	109°14'49.453 6"	34°38'53.699 3"	276.96
SAR 定位结果	109°14'43.638 285"	34°39'1.371 466 5"	

4 结 论

本文结合线性 RD 成像算法深入分析了机载聚束 SAR 图像的绝对定位精度,经过分析得到影响 SAR 定位精度主要有 8 个因素,即:雷达作用距离、斜视角、东北天三向速度和载机在孔径中心时刻东北天三向位置。其中雷达作用距离、斜视角由成像选择的参考点决定,载机东北天三向速度和载机东北天三向位置需要由惯性导航系统提供,由于现有的惯性导航系统精度有限,所以东北天三向速度和载机东北天三向位置误差对 SAR 定位精度的影响很大。其中东北天三向速度分解到距离向的速度误差是影响 SAR 图像定位精度的主要因素。本文推导出机载聚束 SAR 定位误差的解析公式,根据解析公式给出了定位误差与各个变量之间的相对关系曲线,最后通过仿真与实测数据处理验证了本文的研究工作。

参考文献:

- [1] David N, Pedlar A P B. SAR target geolocation performance[C]//Radar Conference. [S. l.]: IEEE, 2005:212-216.
- [2] 姚汉英,孙文峰,钱李昌. 机载条带 SAR 图像绝对定位方法研究[J]. 空军雷达学院学报, 2009, 23(4): 257-260.
Yao Hanying, Sun wenfeng, Qian lichang. A method of absolute positioning of air-borne strip SAR image[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2009, 23(4): 257-260.
- [3] 苗慧,王岩飞,张冰尘,等. 运动误差对机载 SAR 定位精度的影响[J]. 电子测量技术, 2007, 30(1): 63-67.
Miao Hui, Wang Yanfei, Zhang Bingchen, et al. Influence of the motion error to airborne SAR geolocation accuracy[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(1): 63-67.
- [4] 孙文峰,陈安,邓海涛,等. 一种新的机载 SAR 图像几何校正和定位算法[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 553-556.
Sun wenfeng, Chen An, Deng Haitao, et al. A novel geometric calibration and target location algorithm for air-borne SAR image[J]. ACTA Electronica Sinica, 2007, 35(3): 553-556.
- [5] Pedlar D N, Coe D J. Target geolocation using SAR[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2005, 152(1): 36-47.
- [6] Sun H S, Rho S H, Jung Chul H, et al. Geo-loc-

tion error correction for synthetic aperture radar image. IGARSS, 2010: 3406-3409.

- [7] 宋占军,张继贤,黄国满,等. 基于斜距测量误差改正的机载 SAR 间接定位方法研究[J]. 遥感信息, 2011, 4: 23-27.

Song Zhanjun, Zhang Jixian, Huang Guoman, et al. Research on airborne SAR indirect geocoding method based on correction of slant range measurement error [J]. Remote Sensing Information, 2011, 4: 23-27.

- [8] 杨正得,谢亚楠,周星里. 具有解析解的星载 SAR 图像目标定位方法[J]. 电子测量技术, 2010, 33(6): 59-61.

Yang Zhengde, Xie Yanan, Zhou Xingli. Method to target location of spaceborne SAR imagery with analysis solution [J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(6): 59-61.

- [9] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight synthetic radar signal processing algorithms [J]. Artech House Inc, 1995, 225: 401-439.

- [10] 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.

Peng Daiqiang, Lin Youquan, 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.

作者简介:宋伟(1980-),男,博士研究生,研究方向:机载 SAR 成像信号处理, E-mail: sw_818@163.com; 朱岱寅(1974-),男,教授,博士生导师,研究方向:雷达成像和信号处理方面, E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn; 李勇(1977-),男,副教授,研究方向:合成孔径雷达成像算法和雷达信号处理, E-mail: limack@nuaa.edu.cn。