

一种基于持续运动模型的星载 SAR 几何校正方法

仇晓兰^{*①②③} 韩传钊^① 刘佳音^{②③}

^①(北京遥感信息研究所 北京 100192)

^②(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)

^③(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 几何校正是星载 SAR 地面处理的重要环节, 几何校正精度对 SAR 图像的应用有着至关重要的影响。该文分析了传统星载 SAR 几何校正中卫星“停-走”模型近似对几何定位精度的影响, 建立了卫星持续运动模型下的距离多普勒方程, 并提出了持续运动模型下校正方程的简化求解方法。仿真实验和北京地区实际数据几何校正试验验证了该方法的有效性和正确性。

关键词: SAR; 几何校正; 斜距多普勒模型; “停-走”近似; 持续运动模型

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)01-0054-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.20072

A Method for Spaceborne SAR Geolocation Based on Continuously Moving Geometry

Qiu Xiao-lan^{①②③} Han Chuan-zhao^① Liu Jia-yin^{②③}

^①(Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China)

^②(Key Laboratory of Technology on Geo-spatial Information Processing and Application System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Geolocation is a very important step in Synthetic Aperture Radar (SAR) data processing. The precision of geolocation severely affects the applications of SAR images. This paper analyzes the influences on SAR geolocation caused by the traditional “stop-go” approximation, and establishes the range-Doppler equations for the real continuously moving configuration. It also provides a simplified way of solving the equations. Simulations and geolocation experiments on real SAR data of the Beijing area validate the proposed method and show the correctness of the analysis.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Geolocation; Range-Doppler model; “stop-go” approximation; Continuously moving configuration

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天时、全天候对地观测的能力, 而在军事、减灾、测绘等领域有着独特的应用优势。自 20 世纪 50 年代合成孔径的概念被提出以来, 经过约 60 年的发展, SAR 技术得到了长足的进步, 在军事、民用等各个领域发挥着日益重要的作用。星载 SAR 由于不受国界限制、观测范围广、成像效率高, 更成为各国对地观测发展的重点。图像几何校正是星载 SAR 数据处理的重要环节, 只有通过几何校正,

将 SAR 图像的每个像素赋予地理位置信息, SAR 图像才能真正成为地理空间信息的载体, 支撑后续的应用。SAR 图像几何校正的精度对 SAR 图像应用效益的发挥有着至关重要的影响。

影响 SAR 几何定位精度的误差源很多, 包括轨道位置速度测量误差、SAR 系统时间误差、大气传输误差、地面高程误差等, 针对这些误差的分析可以参见文献[1-4]。上述误差主要由测轨及 SAR 系统硬件等器件水平和外部条件决定, 地面处理可以通过一些技术(如依赖地面控制点)进行缓解, 但需付出较大的人力物力代价, 因此通过提高器件水平来获得高几何定位精度成为星载 SAR 的发展重点之一。

2012-09-28 收到, 2012-11-28 改回; 2012-12-31 网络优先出版

国家自然科学基金(61101200)资助课题

*通信作者: 仇晓兰 xlqiu@mail.ie.ac.cn

除上述误差源外，另一个引入几何校正误差的环节是地面处理，包括成像处理和几何校正处理。其中，成像处理中非线性变标、模型参数修正等处理会使图像存在一定的可预知的畸变^[5,6]，通常成像算法研究会给出算法引入的畸变，并将畸变模型输入至几何校正系统，从而规避成像算法的影响。星载 SAR 几何校正方法的研究成果颇多^[7-10]，而针对这些方法引入误差的分析则很少。通常认为基于距离-多普勒模型的 SAR 图像几何定位方法是精确的，如方程求解正确，将不会引入额外的误差。实际上，上述星载 SAR 几何校正方法均基于传统的卫星“停-走”近似模型，即认为 SAR 在发射脉冲到完成该脉冲回波的接收期间是静止的，随后再运动到下一个位置进行下一个脉冲的发射和接收。实际中 SAR 是持续运动的，基于“停-走”近似的几何校正方法存在一定的误差，尤其在高轨道星载 SAR^[11,12]中，该误差将更加明显。

为此，本文主要针对传统星载 SAR 几何校正方法“停-走”近似模型引入的误差进行详细的分析，提出了一种基于持续运动模型的几何校正方法，最后通过仿真和实际数据的处理实验验证了本文分析的正确性和方法的有效性。本文结构安排如下：第 2 节回顾了传统“停-走”模型下星载 SAR 几何校对方程；第 3 节分析了“停-走”模型近似引入的几何定位误差，并提出一种基于持续运动模型下的几何校正方法；第 4 节给出了仿真和实验结果；第 5 节总结全文。

2 “停-走”近似下的星载 SAR 几何校正模型

SAR 具有测距和测多普勒频率的能力，并且能在距离维和多普勒频率维实现高分辨。SAR 图像每个像素均蕴含了 SAR 天线到目标的距离信息和天线与目标之间相对运动的多普勒信息。在 SAR “停-走”模型的假设下，SAR 图像目标地面位置 $\mathbf{R}_t : [x_t, y_t, z_t]^T$ 可由如下 3 个方程联立来确定：

(1) 距离方程 F_1

$$|\mathbf{R}_s(\eta_j) - \mathbf{R}_t| = R_{\text{near}} + N_i \cdot c / 2 / f_s \quad (1)$$

(2) 多普勒方程 F_2

$$f_d = -\frac{2}{\lambda |\mathbf{R}_s(\eta_j) - \mathbf{R}_t|} \mathbf{V}_s(\eta_j) \cdot [\mathbf{R}_s(\eta_j) - \mathbf{R}_t] \quad (2)$$

(3) 地球模型方程 F_3

$$\frac{x_t^2 + y_t^2}{(R_e + h_t)^2} + \frac{z_t^2}{R_{\text{pt}}^2} = 1, \quad R_{\text{pt}} = (1 - f)(R_e + h_t) \quad (3)$$

为简化方程形式，上述方程通常在地球固联坐

标系下建立。其中：

$\mathbf{R}_s(\eta_j) = [x_s(\eta_j), y_s(\eta_j), z_s(\eta_j)]^T$ 为 SAR 天线相位中心的位置矢量；

$\mathbf{V}_s(\eta_j) = [v_{sx}(\eta_j), v_{sy}(\eta_j), v_{sz}(\eta_j)]^T$ 为 SAR 天线相位中心的速度矢量；

λ 为雷达波长；

R_e 为地球模型赤道半径， f 为地球模型扁率因子，在 WGS84 地球模型下， R_e 为 6378137 m， f 约为 0.003352， h_t 为目标相对于地球模型的高程；

R_{near} 为 SAR 图像距离向第 1 个像素对应的近距，计算方法如下：

$$R_{\text{near}} = c(\tau_d - \Delta\tau_{\text{atom}}) / 2 \quad (4)$$

其中 c 为微波在大气中的传播速度， τ_d 为脉冲发射至接收之间的延迟时间， $\Delta\tau_{\text{atom}}$ 为大气引入的传输延时；

N_i 为图像距离向像素号；

f_s 为距离向采样频率；

f_d 为成像采用的多普勒中心频率；

η_j 为图像方位像素号对应的方位时间：

$$\eta_j = \eta_0 + M_j / \text{PRF} \quad (5)$$

其中 η_0 为图像对应的方位向起始时间， M_j 图像方位向像素号，PRF 为脉冲重复频率。在“停-走”模型假设下，脉冲的发射和回波接收在同一个时刻，故图像方位像素号对应方位时刻可采用式(5)的计算方法。通常在实际 SAR 系统中，系统给出方位时间并录入每个回波的辅助数据中，系统方位时间常对应于回波录取起始时刻，从而式(5)计算得到的方位时间常为该回波录取的起始时间。

3 持续运动模型下的星载 SAR 几何校正方法

在真实的持续运动模型下，脉冲的接收时刻滞后于脉冲发射时刻，在该段时间内卫星持续运动，故 SAR 卫星在脉冲发射时刻和接收时刻位置并不相同。在持续运动模型下，距离方程和多普勒方程应写为如下形式：

(1) 距离方程 F_1

$$|\mathbf{R}_s(\eta_{j-t}) - \mathbf{R}_t| + |\mathbf{R}_s(\eta_{j-r}) - \mathbf{R}_t| = 2R_{\text{near}} + N_i \cdot c / f_s \quad (6)$$

(2) 多普勒方程 F_2

$$f_d = -\frac{1}{\lambda |\mathbf{R}_s(\eta_{j-t}) - \mathbf{R}_t|} \mathbf{V}_s(\eta_{j-t}) \cdot [\mathbf{R}_s(\eta_{j-t}) - \mathbf{R}_t] - \frac{1}{\lambda |\mathbf{R}_s(\eta_{j-r}) - \mathbf{R}_t|} \mathbf{V}_s(\eta_{j-r}) \cdot [\mathbf{R}_s(\eta_{j-r}) - \mathbf{R}_t] \quad (7)$$

其中 η_{j-t} 和 η_{j-r} 分别是方位像素号为 M_j 的目标对

应的脉冲发射时刻和该目标回波脉冲被接收的时刻。即有

$$\eta_{j_t} = \eta_{j_r} - (2R_{\text{near}} + N_i \cdot c / f_s) / c \quad (8)$$

而目标的回波脉冲接收时刻则有:

$$\eta_{j_r} = \eta_0 + M_j / \text{PRF} + N_j / f_s \quad (9)$$

于是:

$$\eta_{j_t} = \eta_0 + M_j / \text{PRF} - 2R_{\text{near}} / c \quad (10)$$

可见脉冲发射时刻与目标所处距离向像素位置无关, 而脉冲接收时刻则与目标所处距离向像素位置有关, 这与 SAR 成像的实际物理过程相吻合。

3.1 “停-走”近似模型误差分析

基于上述方程, 下面对传统“停-走”近似模型引入的几何定位误差进行分析。首先比较距离方程 F_1' 和 F_1 。由于脉冲收发的时间间隔 $(2R_{\text{near}} + N_i \cdot c / f_s) / c$ 较短, 设 $R_{\text{near}} = 800 \text{ km}$, 则上述时间间隔仅为约 5 ms, SAR 速度约为 7000 m/s, 该段时间间隔内卫星运动距离约为 35 m。则:

$$\left| \mathbf{R}_s(\eta_{j_t}) - \mathbf{R}_t \right| + \left| \mathbf{R}_s(\eta_{j_r}) - \mathbf{R}_t \right| - 2 \left| \mathbf{R}_s(\eta_j) - \mathbf{R}_t \right| \approx 1.194 \times 10^{-4} \text{ m} \quad (11)$$

可见, F_1' 确定的椭球面与 F_1 确定球面之间仅有亚毫米级的差异。因此“停-走”近似对距离方程的影响非常小, 可以忽略。

下面比较多普勒方程 F_2' 与 F_2 , 此处给出便于理解的简化分析, 第 3.2 节及第 4 节中将给出一般情况下的定量仿真结果。简单起见, 假设成像时采用的中心频率为零(如图 1 所示), 在“停-走”模型近似下, η_j 通常对应于回波接收时刻, 故 SAR 假设为静止在 R 处。故, 零多普勒平面为经过 RP 且与 x 方向平行的平面, 在距离方程的限制下, 设其与地面交点为 P 。然而在持续运动模型下, SAR 发射位置为 T , 接收位置为 R , 此时求得的零多普勒频率面为如图所示经过 $\angle TP'R$ 角平分线(即 MP') 且与 x 方向平行的平面。在距离方程限制下, 其与地面交点为 P' 。可见, “停-走”模型将引起目标方位向的定位误差, 误差大小 $|PP'|$ 约为

$$\Delta a_i \approx V_{\text{sg}} (R_{\text{near}} / c + N_i / f_s / 2) \quad (12)$$

其中 V_{sg} 为卫星的轨速。由式(12)可见, “停-走”模型引入的目标方位向定位误差还与目标的距离向像素位置有关, 也即传统的“停-走”近似模型将引入图像畸变。

3.2 持续运动模型下的几何校正方法

由于方程 F_1' , F_2' 较 F_1 , F_2 更为复杂, 因此持续运动模型下目标位置求解也更为困难。下面基于 3.1 节的分析给出一种持续运动模型下的距离-多普勒

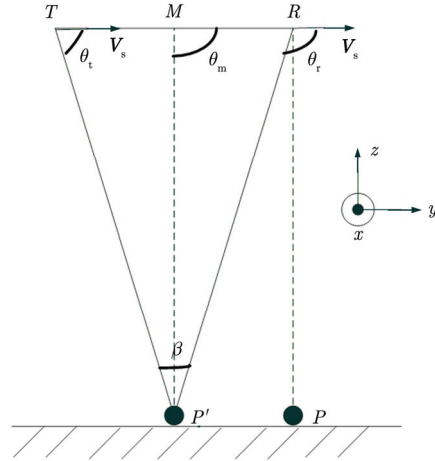


图 1 “停-走”模型与持续运动模型多普勒方程求解示意图

Fig. 1 Illustration of the Doppler function solutions in “stop-go” and “continuously moving” configurations

方程的简化形式, 从而可以沿用传统校正方程的求解方法。

由 3.1 节的分析, “停-走”模型对于距离方程的影响可以忽略, 因此将距离方程直接简化成如下形式:

(1) 距离方程 F_1''

$$\left| \mathbf{R}_s(\eta_{j_m}) - \mathbf{R}_t \right| = R_{\text{near}} + N_i \cdot c / f_s / 2 \quad (13)$$

为了沿用传统校正方程的求解方法, 将多普勒方程简化成如下形式:

(2) 多普勒方程 F_2''

$$f_d = -\frac{1}{\lambda \left| \mathbf{R}_s(\eta_{j_t}) - \mathbf{R}_t \right|} \mathbf{V}_s(\eta_{j_t}) \cdot \left[\mathbf{R}_s(\eta_{j_t}) - \mathbf{R}_t \right] - \frac{1}{\lambda \left| \mathbf{R}_s(\eta_{j_r}) - \mathbf{R}_t \right|} \mathbf{V}_s(\eta_{j_r}) \cdot \left[\mathbf{R}_s(\eta_{j_r}) - \mathbf{R}_t \right] \approx -\frac{2}{\lambda \left| \mathbf{R}_s(\eta_{j_m}) - \mathbf{R}_t \right|} \mathbf{V}_s(\eta_{j_m}) \cdot \left[\mathbf{R}_s(\eta_{j_m}) - \mathbf{R}_t \right] \quad (14)$$

其中 η_{j_m} 为待定的等效方位时刻, 下面给出其确定方法。

由于脉冲发射和接收之间的时间间隔为毫秒级, 因此可以认为在此期间卫星为匀速直线运动, 即 $\mathbf{V}_s(\eta_{j_m}) = \mathbf{V}_s(\eta_{j_t}) = \mathbf{V}_s(\eta_{j_r})$ 。则方程式(14)可转换为

$$\cos \theta_t + \cos \theta_r \approx 2 \cos \theta_m \quad (15)$$

其中 θ_t 和 θ_r 如图 1 所示, 分别为脉冲发射和接收时刻卫星速度与卫星至目标距离矢量之间的夹角, 即斜视角的余角, 有

$$\cos \theta_t = \frac{\mathbf{V}_s(\eta_{j_t}) \cdot \left[\mathbf{R}_s(\eta_{j_t}) - \mathbf{R}_t \right]}{\left| \mathbf{V}_s(\eta_{j_t}) \right| \left| \mathbf{R}_s(\eta_{j_t}) - \mathbf{R}_t \right|} \quad (16)$$

$$\cos \theta_t = \frac{\mathbf{V}_s(\eta_{j_r})}{|\mathbf{V}_s(\eta_{j_r})|} \cdot \frac{\mathbf{R}_s(\eta_{j_r}) - \mathbf{R}_t}{|\mathbf{R}_s(\eta_{j_r}) - \mathbf{R}_t|} \quad (17)$$

$$\cos \theta_m = \frac{\mathbf{V}_s(\eta_{j_m})}{|\mathbf{V}_s(\eta_{j_m})|} \cdot \frac{\mathbf{R}_s(\eta_{j_m}) - \mathbf{R}_t}{|\mathbf{R}_s(\eta_{j_m}) - \mathbf{R}_t|} \quad (18)$$

又

$$\cos \theta_t + \cos \theta_r = 2 \cos\left(\frac{\theta_t + \theta_r}{2}\right) \cos(\beta/2) \quad (19)$$

其中 β 如图 1 所示。由于在星载 SAR 情况下, β 非常小, $1 - \cos(\beta/2)$ 小于 10^{-9} , 因此有

$$\cos \theta_t + \cos \theta_r \approx 2 \cos\left(\frac{\theta_t + \theta_r}{2}\right) \quad (20)$$

故

$$\theta_m \approx (\theta_t + \theta_r)/2 \quad (21)$$

即图 1 中等效点 M 为 $\angle TP'R$ 的角平分线与卫星航迹的交点。又因星载 SAR 通常斜视角较小, 尤其当采用偏航控制后, 成像几何接近正侧视, 故等效点 M 可近似为收发位置的中点, 例如当等效中心斜视角为 3° , 斜距为 800 km 时, 等效点 M 与收发位置中点之间的距离仅为 3.9×10^{-5} m。由此,

$$\eta_{j_m} = \eta_0 + M_j / \text{PRF} - R_{\text{near}} / c + N_i / f_s / 2 \quad (22)$$

通过上述简化, 星载 SAR 几何定位仍可沿用传统“停-走”近似模型下的求解方法, 仅需将目标对应的方位时刻改变为脉冲收发时刻的中间时刻即可。

4 仿真分析与实验

为了验证上述分析的正确性和校正方法的有效性, 下文首先对低轨星载 SAR 进行仿真实验, 接着将该方法用于遥感卫星的实际数据处理, 并给出实测结果。

4.1 仿真实验

仿真参照 RadarSAT-1 系统设置参数并进行了适当的调整, 如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

| 参数 | 数值 |
|----------|--|
| 轨道高度 | 580 m |
| f_s | 115 MHz |
| PRF | 3480 Hz |
| 中心视角 | 38° |
| 卫星轨道位置 | 北纬 45° |
| 波束中点目标斜距 | 662755.319363 m |
| 点目标分布 | 5×5 点阵, 斜距向间隔 3000 个距离门, 方位向间隔 3000 个 PRT |

在基于传统“停-走”近似模型下, 点目标定位误差如图 2 所示, 采用持续运动模型下简化距离-多普勒方程后, 定位误差如图 3 所示。图 2 和图 3 中的像素位置通过对图像升采样 64 倍后确定, 故目标像素位置精度为 0.0156 个像素。此外, 图中目标编号规则为 1~5 号点为近距离目标, 对应方位时间依次递增, 21~25 号点为远距离目标, 以此类推。

由上述仿真结果可见, 在传统的“停-走”模型近似下, SAR 图像距离向定位误差几乎为零, 沿方位向则存在约 7.5 个像素左右的误差, 由此导致本仿真条件下存在约 15 m 的定位误差。此外, 由图 2 可见, 在传统“停-走”模型近似下, 不同距离门的目标方位定位误差还存在约 0.3 m 变化。这一畸变与式(12)理论计算的结果一致: 在本仿真条件下, 卫星地速为 7045.4 m/s, 近距离和远距离目标相差 12000 个距离采样, 因此, 根据式(12)计算得到近距离和远距离目标之间方位定位误差差异为 0.352 m, 与仿真结果基本吻合, 从而验证了分析的正确性。采用本文提出的持续运动模型简化方程后, 方位向的几何定位误差得到了很好的消除, 定位误差在 0.2 m 以内(见图 3)。此外需要说明的是, 本仿真结果中同一距离门的目标沿方位向

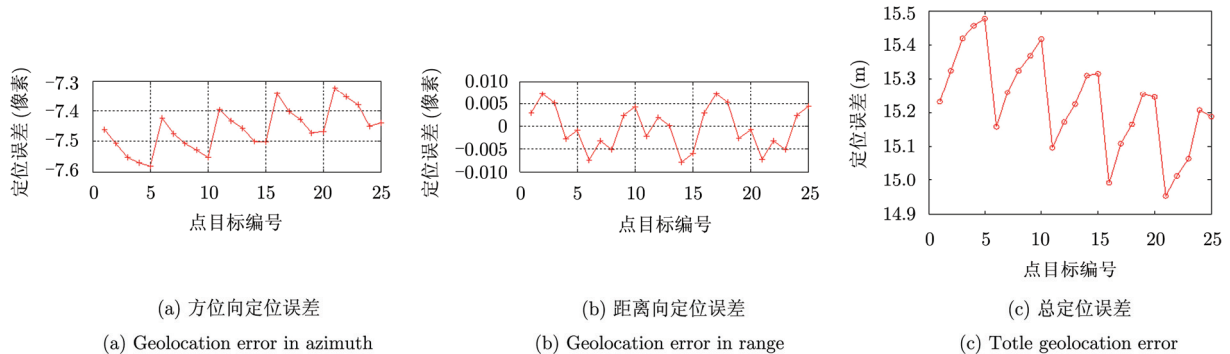


图 2 传统“停-走”近似模型下的定位误差

Fig. 2 The geolocation error under the traditional “stop-go” approximation

存在 0.1 个像素以内规律性的几何定位误差, 该误差由仿真系统中成像处理器引入, 由于误差量级较小, 未予以校正。

4.2 实际数据几何校正实验

为了验证本文方法的有效性, 对 RadarSAT-1 的两景北京地区 SAR 图像进行了几何校正实验, 并在该地区用差分 GPS 实测了 17 个地面检查点进行检验, 检验结果如图 4、图 5 所示。采用本文的持续运动模型简化定位方程后, 方位向定位误差明显减小, 从而使得 SAR 图像几何定位精度有了显

著的提高, 证明了方法的有效性。

5 总结

本文针对传统几何校正中采用的“停-走”近似模型, 分析了该近似引入的定位误差并给出了理论公式。在此基础上提出了基于持续运动模型的几何校正方程, 提高了星载 SAR 几何定位精度, 并通过分析给出了几何校正方程的简化形式, 从而可以沿用传统的几何校正方法。仿真和实际数据处理实验验证了分析的正确性和方法的有效性。

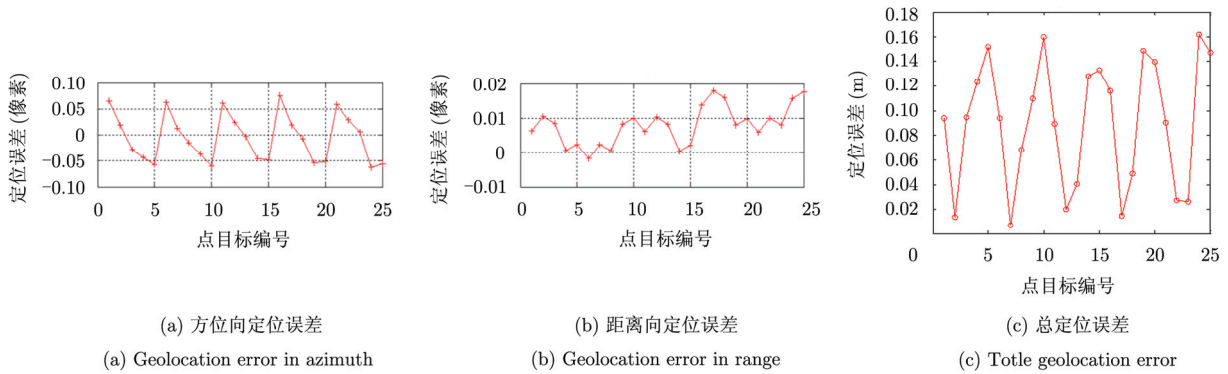


图 3 持续运动简化模型下的定位误差

Fig. 3 The geolocation error under the simplified “continuously moving” configuration

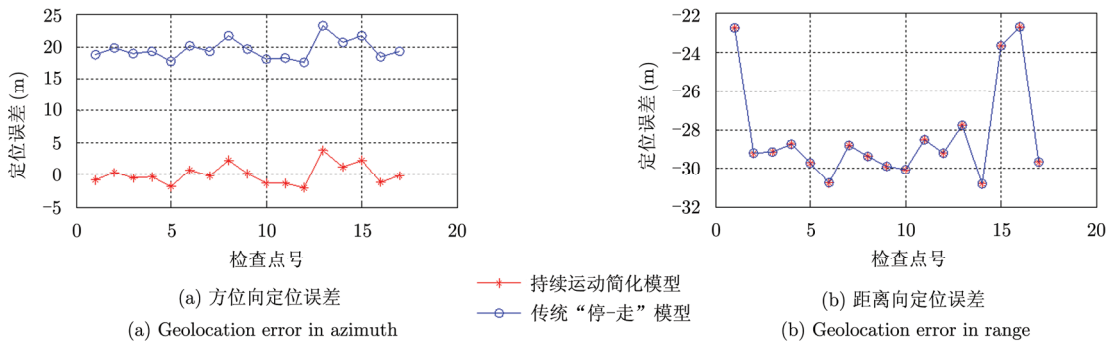


图 4 第 1 景北京图像几何定位结果

Fig. 4 The geolocation result of the first scene of Beijing

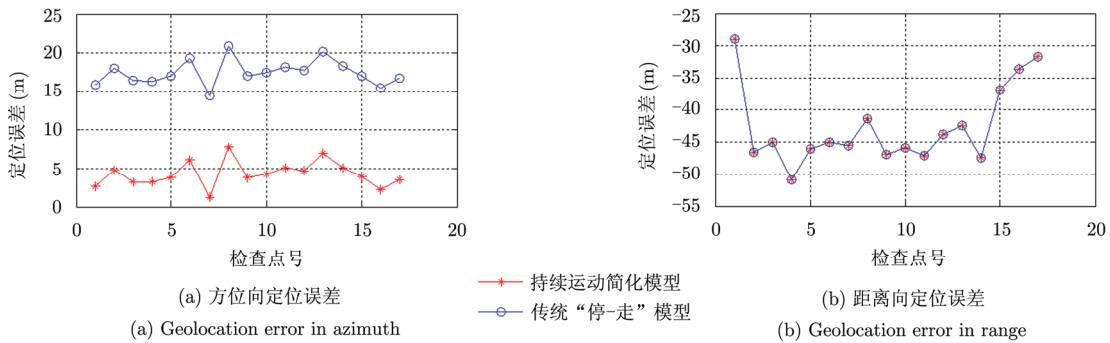


图 5 第 2 景北京图像几何定位结果

Fig. 5 The geolocation result of the second scene of Beijing

参 考 文 献

- [1] Curlander J C. Location of spaceborne SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1982, 20(3): 359-364.
- [2] Curlander J C. Utilization of spaceborne SAR data for mapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1984, 22(2): 106-112.
- [3] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 17-22.
Wei Zhong-quan. Synthetic Aperture Radar Satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001: 17-22.
- [4] 陈元藻. 合成孔径雷达卫星定位误差源分析[J]. 上海航天, 1998, (3): 16-21.
Chen Yuan-zao. Primary analysis of location error sources synthetic aperture radar satellite[J]. *Aerospace Shanghai*, 1998, (3): 16-21.
- [5] Qiu Xiaolan, Hu Donghui, and Ding Chibiao. An improved NLCS algorithm with capability analysis for one-stationary BiSAR[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3179-3186.
- [6] Qiu Xiaolan, Hu Donghui, and Ding Chibiao. Non-linear chirp scaling algorithm for one-stationary bistatic SAR[C]. 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Nov. 5-9, 2007: 111-114.
- [7] 周金萍, 唐伶俐, 李传荣. 星载 SAR 图像的两种实用化 R-D 定位模型及其精度比较[J]. 遥感学报, 2001, 5(3): 192-197.
Zhou Jin-ping, Tang Ling-li, and Li Chuan-rong. Development of two practical R-D location model and precision comparison between them[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(3): 192-197.
- [8] 刘秀芳, 刘佳音, 洪文. SAR 图像地理编码处理流程的研究[J]. 遥测遥控, 2005, 26(4): 12-18.
Liu Xiu-fang, Liu Jia-yin, and Hong Wen. Research on the data flow of SAR geocoding[J]. *Journal of Telemetry: Tacking and Command*, 2005, 26(4): 12-18.
- [9] 陈尔学, 李增元. ENVISAT ASAR 影像地理定位方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(8): 991-995.
Chen Er-xue and Li Zeng-yuan. Study on ENVISAT ASAR image geolocation method[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(8): 991-995.
- [10] Liu Xin, Ma Hongbin, and Sun Weidong. Study on the geolocation algorithm of space-borne SAR image[C]. International Workshop on Intelligent Computing in Pattern Analysis/Synthesis (IWICPAS), Berlin, Germany, 2006: 270-280.
- [11] Huang Lijia, Qiu Xiaolan, Hu Donghui, et al. Focusing of medium-earth-orbit SAR with advanced nonlinear chirp scaling algorithm[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 500-508.
- [12] 李军, 邢孟道, 李亚超, 等. 同步轨道 SAR 参数分析及成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(5): 931-936.
Li Jun, Xing Meng-dao, Li Ya-chao, et al. Parametric analysis and imaging method of geosynchronous SAR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(5): 931-936.

作 者 简 介



仇晓兰(1982-), 女, 北京市遥感信息研究所在站博士后, 中国科学院电子学研究所副研究员, 主要研究领域为单/双站 SAR 成像技术、SAR 几何校正技术、InSAR 处理技术, 出版专著一部, 发表论文 20 余篇。

E-mail: xlqiu@mail.ie.ac.cn

韩传钊(1971-), 男, 博士, 北京市遥感信息研究所研究员, 主要研究领域为星载 SAR 系统技术。

刘佳音(1976-), 女, 中国科学院电子学研究所在职博士研究生, 主要研究领域为 SAR 几何定位技术。