

机载高分辨率 SAR 图像直接对地定位原理及精度分析

尤红建¹ 丁赤彪¹ 向茂生¹

(1 中国科学院电子学研究所,北京市北四环西路 19 号,100080)

摘 要:依据机载 SAR 成像的原理,给出了一种实用的机载 SAR 直接对地定位公式,并结合获取的高分辨率图像进行了定位纠正,取得了较好的效果。根据机载 SAR 图像对地定位的原理,推导了定位误差的传播公式,并进行了一些误差模拟研究。
关键词:SAR 图像;GPS;定位;精度
中图法分类号:TP751;P225.1

合成孔径雷达(SAR)平台可以分为机载和星载两种。和星载 SAR 相比,机载 SAR 具有能按需求获取数据、灵活机动、容易更换雷达遥感器等特点,而且它可以作为星载 SAR 发展的试验平台,因此机载 SAR 具有独特的应用价值和发展空间。

虽然机载 SAR 可以获取高分辨率的地物图像信息,但由于飞机运动载体位置和速度的变化,使得成像得到的 SAR 图像发生一些几何变形。要真正发挥机载 SAR 遥感对地观测的作用,就必须实现其图像的快速定位。高精度的 GPS 定位系统可以提供精确的位置和速度信息,以实现机载 SAR 图像的自动对地定位和纠正。

1 基于 GPS 的机载 SAR 直接对地定位原理

1.1 直接定位的模型基础

传统的 SAR 图像定位方法有多项式模型、共线方程模型和距离多普勒模型^[1~4]。

侧视斜距成像和多普勒频移是 SAR 成像的两个特点,因此基于距离多普勒的定位方法具有明确的几何和物理意义,符合雷达遥感的成像机理。雷达成像得到的斜距图像,符合斜距方程,机载 SAR 采用合成孔径根据多普勒频移进行成像,而且成像点和飞机平台之间符合零多普勒原理,

因此可以建立机载 SAR 斜距图像坐标和地面坐标之间的函数关系,它是实现机载 SAR 图像“空地”自动定位的基础。

对于第 i 个方向的扫描行,斜距图像上的第 j 个点,应该满足如下的函数模型:

$$\left. \begin{aligned} &\sqrt{(X_P - X_G)^2 + (Y_P - Y_G)^2 + (Z_P - Z_G)^2} \\ &= R = \gamma_0 + j \cdot M \\ &V_{GX}(X_G - X_P) + V_{GY}(Y_G - Y_P) + V_{GZ}(Z_G - Z_P) \\ &= -f_d \cdot \lambda \cdot R/2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, r_0 为近地点地斜距; M 为斜距的分辨率,一般都是已知的参数; $(X_G, Y_G, Z_G, V_{GX}, V_{GY}, V_{GZ})$ 为 GPS 给出的对应于第 i 行飞机的三维位置和三维速度; f_d 为多普勒频率; λ 为波长; R 为平台和地面的距离。式(1)建立了斜距图像 (i, j) 和实际坐标 (X_P, Y_P, Z_P) 之间的对应关系。

1.2 定位公式的建立

距离多普勒方程准确描述了 SAR 的构像模型,但是要实现图像的定位,这两个方程还不能反演出地面的三维坐标,要应用地球的椭球模型方程,以及牛顿迭代法进行非线性方程组的求解^[2]。

基于距离、多普勒和地球模型的迭代解算方法在星载 SAR 上得到了应用。而对于机载 SAR,由于飞行高度有限,作业面积较小,因此,可直接求解图像像素对应的地面坐标。

地面是一个球面,如果在一定范围内用平面代替球面,则地球曲率对水平距离的影响 ΔS (即球面距离和平面距离的差值)为^[8]:

$$\Delta S \approx \frac{1}{3} \frac{S^3}{R^2}$$

式中, S 为平面距离(用平面代替的地球球面); R 为地球半径。当距离为 30 km 时,地球曲率对距离影响为 0.22 m。目前机载雷达图像的高分辨率为 50 cm,因此,在 30 km 半径范围内,可以不考虑地球的曲率,直接将地球表面看成是一个平面。

在机载情况下,可以采用平面投影坐标作为图像定位的坐标基准,因为我国采用了高斯投影坐标作为制图的基础。对于成像区域可以得到地面的平均高度 h ,它也作为图像定位的高度。图像定位其实就是计算出图像相对于飞机位置的相对坐标,然后根据飞机平台的位置实现图像的绝对定位,因此,可以令 $\Delta X = X_G - X_P$; $\Delta Y = Y_G - Y_P$; $\Delta Z = Z_G - h$ 。则式(1)变成:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_2 + \Delta Y_2 + \Delta Z_2 &= (r_0 + j \cdot M)^2 \\ V_{GX} \Delta X + V_{GY} \Delta Y + V_{GZ} \Delta Z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

根据式(2)可以解得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \\ \Delta Y &= \frac{(-V_{GZ} \cdot \Delta Z - V_{GX} \cdot \Delta X)}{V_{GY}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} A &= 1 + \left(\frac{V_{GX}}{V_{GY}} \right)^2 \\ B &= \frac{2 \cdot V_{GX} \cdot V_{GZ} \cdot \Delta Z}{V_{GY}^2} \\ C &= \frac{V_{GZ}^2 \cdot \Delta Z^2}{V_{GY}^2} + \Delta Z^2 - (r_0 + j \cdot M)^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

因此斜距图像上的一点 (i, j) 对应的地面坐标为:

$$\left. \begin{aligned} X_P &= X_G - \Delta X \\ Y_P &= Y_G - \Delta Y \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

1.3 SAR 图像自动定位的实现流程

对于机载 SAR 斜距图像,可以采用图 1 所示的处理步骤进行图像的直接对地定位。由于 GPS 的采样频率有限,目前最高的采样率也只能达到 100 Hz,而 SAR 的方位向采样频率却达到了 1 500 Hz,因此不能保证每个扫描行上都有对应的 GPS 定位结果,而必须根据低采样的 GPS 位置、速度来内插出高采样频率 SAR 扫描行所对应的三维位置和速度。

GPS 给出的位置和速度一般是地理坐标,因此要根据高斯投影公式计算平面坐标和子午线收敛角,然后据子午线收敛角将对应于真北方位系

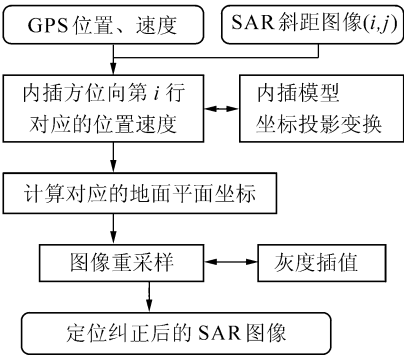


图 1 机载 SAR 图像自动对地定位的处理流程
Fig. 1 Processing Flowchart of Airborne SAR Image Localization

统的速度转换成坐标北方位系统下的三维速度。

根据式(5),可以准确计算出每个像素点对应的地面坐标。本文采用了机载 SAR 图像进行了定位计算,在飞行获取 SAR 数据时采用 JAVAD 双频测量型 GPS 接收机同步记录了原始数据;然后和地面基准站的原始数据进行相位后差分处理,获得了 cm 级的定位精度和速度;最后进行了图像的自动定位纠正处理。图 2 就是经过合成孔径成像得到的机载 SAR 原始图像,由于没有定位纠正,变形还是很明显的。图 3 是采用 GPS 位置和速度进行定位纠正后的图像,通过比较分析可以看出,定位纠正的效果十分明显。

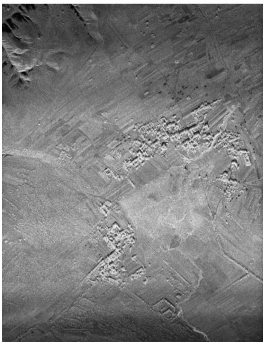


图 2 原始的机载高分辨率 SAR 斜距图像
Fig. 2 High Resolution Raw SAR Range Image

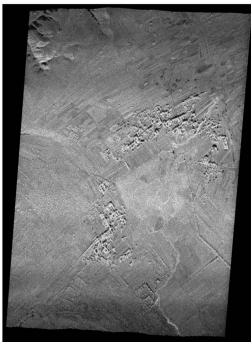


图 3 基于 GPS 纠正的 SAR 图像
Fig. 3 Rectified SAR Image Based on GPS

1.4 实际定位精度的检验

为了检验机载高分辨率雷达图像的对地定位精度,笔者在北京西南地区的 SAR 图像上选择了 11 个明显标志点,这些点主要分布在道路的交叉点和地物分界处。通过采用静态 GPS 测量方法得到实际的地面测量结果,然后再从纠正的 SAR 图像上量取定位计算的结果,根据实际测量的结果和定位计算的结果就可以检验 SAR 直接对地

定位的精度。经过统计,误差分别为东向 0.98 m,北向 2.73 m。表 1 给出了具体的比较情况。

2 误差传播和定位精度分析

由于机载 SAR 图像的定位精度是根据 GPS 定位结果进行解算的,因此 GPS 定位的精度将会

直接影响到图像最终定位的精度。为此采用误差传播定律对机载 SAR 图像的定位误差进行研究。

假设 GPS 定位的三个位置分量误差均为 m_p ,三个速度分量的误差也都是 m_v ,则根据式(5)可以得到图像定位的误差为:

$$m_p^2 = m_{X_p}^2 + m_{Y_p}^2 = m_{X_G}^2 + m_{Y_G}^2 + m_{\Delta_x}^2 + m_{\Delta_y}^2 \quad (6)$$

而由式(3)可以得到两个位置分量的误差分别为:

表 1 机载 SAR 定位精度的实测精度检验

Tab. 1 The Accuracy Checking of Airborne SAR Localization

点号	地面测量值/m		定位计算值/m		差值/m	
	东向	北向	东向	北向	东向	北向
1	425 717.86	4 403 725.55	425 718.64	4 403 727.28	-0.78	-1.73
2	425 517.58	4 403 859.44	425 517.29	4 403 862.17	0.29	-2.73
3	425 501.19	4 403 381.08	425 500.78	4 403 381.20	0.41	-0.12
4	425 550.25	4 403 071.82	425 550.12	4 403 070.16	0.13	1.66
5	425 275.41	4 402 674.03	425 274.37	4 402 671.35	1.04	2.68
6	425 216.90	4 402 711.27	425 215.05	4 402 709.18	1.85	2.09
7	425 280.32	4 402 812.93	425 278.51	4 402 810.37	1.81	2.56
8	425 339.55	4 402 775.85	425 337.59	4 402 773.44	1.96	2.41
9	425 106.67	4 402 676.99	425 104.25	4 402 675.20	2.42	1.79
10	424 659.68	4 402 036.49	424 659.18	4 402 040.91	0.50	-4.42
11	424 455.75	4 402 163.61	424 455.24	4 402 167.44	0.51	-3.83
中误差					0.98	2.73

$$\left. \begin{aligned} m_{\Delta_x}^2 &= \left[\frac{\sqrt{B^2 - 4AC} + B}{2A \sqrt{B^2 - 4AC}} \right]^2 m_B^2 + \frac{1}{B^2 - 4AC} m_C^2 + \left[\frac{C^2}{A^2 (B - 4AC)} + \left(\frac{B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A^2} \right)^2 \right] m_A^2 \\ m_{\Delta_y}^2 &= \left[\frac{\Delta Z^2 + \Delta X^2}{V_Y^2} + \left(\frac{\Delta Z V_Z - \Delta X V_X}{V_Y^2} \right)^2 \right] m_V^2 + \frac{V_Z^2}{V_Y^2} m_P^2 + \frac{V_X^2}{V_Y^2} m_{\Delta X}^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据式(4)可以得到:

$$\left. \begin{aligned} m_A^2 &= \left(\frac{2V_X V_Y - 2V_X^2}{V_Y^3} \right)^2 m_V^2 \\ m_B^2 &= \left(\frac{2V_Z V_Y \Delta Z + 2V_X V_Y \Delta Z + 4V_X V_Z \Delta Z}{V_Y^3} \right)^2 m_V^2 + \left(\frac{2V_X V_Z}{V_Y^2} \right)^2 m_P^2 \\ m_C^2 &= \left(\frac{2V_Z V_Y \Delta Z^2 - 2V_Z^2 \Delta Z^2}{V_Y^3} \right)^2 m_V^2 + \left(\frac{2V_Z^2 \Delta Z + 2V_Y^2 \Delta Z}{V_Y^2} \right)^2 m_P^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

因此,如果知道位置分量误差 m_p 和速度误差 m_v ,则可以应用式(6)~式(8)计算图像定位的精度。根据误差传播公式可以看出,速度精度对定位精度影响明显。目前 GPS 单点定位的位置精度为 15 m,速度精度为 0.10 m/s;而采用载波相位差分后,定位精度可以优于 10 cm,速度误差为 0.01 m/s。

假设飞行高度 7 000 m,侧视角 45°,飞行速度为 140 m/s,若采用载波相位差分,位置误差为 5 cm,速度误差为 0.01 m/s,则可以计算得到图像的定位误差为 0.49 cm;若采用单机定位,位置误差 15 m,速度误差 0.10 m/s,则图像的定位精度为 15.6 m。

为了研究不同飞行高度和不同侧视角情况,

分别采用单机 GPS 定位和载波相位差分 GPS 进行机载 SAR 图像的对地定位所能获得的精度,进行定位精度的模拟。图 4 是在 45°侧视角、飞行速度为 150 m/s 时,采用单机定位和载波相位差分 GPS 的位置和速度进行图像定位的误差随飞行高度变化的曲线。图 5 显示了飞行高度 7 000 m、飞行速度 150 m/s 时,采用单机定位和载波相位差分 GPS 的位置和速度进行图像定位的误差随侧视角变化的曲线。

通过图像定位精度的变化曲线,可以得到如下结论:① 图像的最终定位精度和飞行高度、GPS 定位精度和侧视角密切相关;② 随着飞行高度的增加,定位精度会降低,它们近似成线性关系;③ 采用相位差分 GPS 的图像定位精度明显

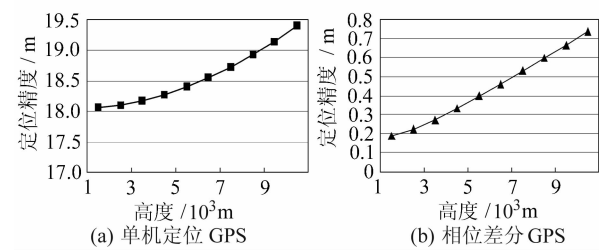


图 4 图像定位精度随飞行高度的变化
Fig. 4 Accuracy vs. Flight Height

高于单机定位的 GPS 图像定位精度,精度高一个数量级以上;④ 在飞行高度一定的情况下,定位精度随着侧视角不同而有所变化,采用单机定位 GPS 时,图像的定位精度和侧视角成近似线性关系;但采用相位差分 GPS 时,图像的定位精度和侧视角成抛物线变化。

3 结 论

在机载 SAR 图像的局部区域内,采用统一的平均高度来代替图像的实际高度是一种近视处理,对于平坦地区是适用的,但对于地面起伏比较大的地区该方法就显得不足,因为地形起伏对侧视雷达的图像影响十分大,因此若要真正实现地形起伏地区的图像对地定位,就必须获取该测区的 DEM,一般的机载 SAR 是不能实现的。随着干涉 SAR 的发展,就可以快速获取 DEM,因此干涉 SAR 既能获取地面的三维信息,又可以实现图像的精确对地定位,将是未来发展的新型 SAR 技

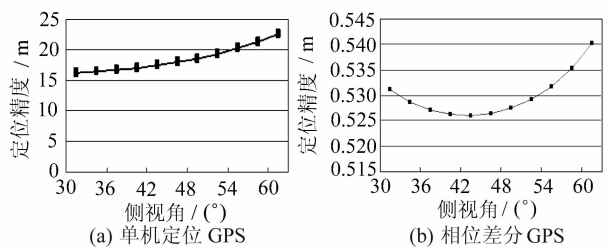


图 5 图像定位精度随侧视角的变化
Fig. 5 Accuracy vs. Side Angle

术系统。

参 考 文 献

1 朱彩英,徐 青,吴丛晖,等. 机载 SAR 图像几何纠正的数学模型研究. 遥感学报,2003,7(2):112~117
2 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. 遥感学报,2001,5(3):191~197
3 Tannous I, Pikeroen B. Parametric Modeling of Spaceborne SAR Image Geometry Application: SEASAT/SPOT Image Registration. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994,60: 755~766
4 吕京国,李建平. 星载合成孔径雷达影像正射纠正算法的研究与实现. 遥感技术与应用,2002,17(4):230~234
5 陆国胜. 测量学. 北京:测绘出版社,1991

第一作者简介:尤红建,副研究员,博士。主要从事机载遥感方面的研究工作,已经发表学术论文 30 多篇。
E-mail:youhongjian@263.net

Principle and Accuracy for Airborne SAR Image Direct Localization

YOU Hongjian¹ DING Chibiao¹ XIANG Maosheng¹

(1 Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 19 Beisihuan Road ,Beijing 100080,China)

Abstract: A practical localization formula is given in the paper on the basis of the principle of airborne SAR imaging. This method is used to rectify the 0.5m airborne image and the result is satisfactory. The error of SAR image localization is also proposed according to the error propagation law and some conclusions are drawn based on some error simulations.
Key words: SAR image; GPS; localization; precision

About the first author: YOU Hongjian, associate professor, Ph.D. He is mainly engaged in the research of airborne remote sensing. His published papers are more than 30.
E-mail: youhongjian@263.net