

# 机载 SAR 图像无控制点直接定位方法\*

潘志刚<sup>†</sup>, 潘卓, 曹舸

(中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

(2014 年 6 月 30 日收稿; 2015 年 3 月 18 日收修改稿)

Pan Z G, Pan Z, Cao G. A direct location method for air-borne SAR image without ground control points [J].  
Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(4): 536-541.

**摘要** 提出一种机载合成孔径雷达(SAR)图像无控制点定位方法. 该方法利用 SAR 图像辅助数据中的相关参数, 依据大地坐标系其中一点的地理坐标以及两点之间的距离-方位关系进行直接的大地主题解算, 将 SAR 图像定位问题转换为大地主题解算问题, 实现直接定位. 对影响定位精度的系统误差因素进行仿真分析. 利用实际的机载 SAR 数据进行目标定位实验, 结果验证了该方法的有效性.

**关键词** 合成孔径雷达; 目标定位; 大地主题解算; 最优化方法

中图分类号: TN957 文献标志码: A doi: 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2015. 04. 016

## A direct location method for air-borne SAR image without ground control points

PAN Zhigang, PAN Zhuo, CAO Ge

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

**Abstract** A location method without reference points for air-borne SAR image is proposed. This method exploits related parameters in auxiliary data of SAR image, based on geographic coordinates of a point and the correlation of range-azimuth between this point to another point in the geodetic coordinate system, convert the problem of SAR image location to solution of geodetic problem. The effects on location precision caused by system error are studied. The experimental results on real-world SAR image validate effectiveness of the proposed method.

**Key words** synthetic aperture radar (SAR); target location; solution of geodetic problem; optimization

传统的 SAR 图像定位校正方法有多项式模型、共线方程模型<sup>[1-2]</sup> 和距离-多普勒模型<sup>[3-5]</sup>. 多项式模型根据输入的地面控制点建立图像坐标和地理坐标之间的多项式变换关系, 将图像的实

际变形情况用多项式描述; 共线方程模型按等效中心投影方式建立 SAR 成像模型, 本质上是一种近似处理, 因此多项式模型和共线方程模型均不符合机载 SAR 的侧视成像原理, 没有明确的物理

\* 国家自然科学基金(61101201)资助

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: zgpan@mail.ie.ac.cn

意义,不能应用于图像的自动实时定位,必须依赖于控制点来反演出模型参数,然后才能进行图像的定位校正。

目前 SAR 图像定位使用较多的是距离-多普勒(Range-Doppler)方法<sup>[6-7]</sup>,该方法基于 SAR 侧视斜距成像和多普勒频移 2 个特点,具有明确的几何意义和物理意义.雷达成像得到的斜距图像符合斜距方程,机载 SAR 采用合成孔径方法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中心频率原理,因此可以建立机载 SAR 斜距图像坐标和地理坐标之间的函数关系,实现机载 SAR 图像“空-地”自动定位.但是该方法实现过程中需要进行坐标系的转换,且求解距离-多普勒方程组时需要给出迭代的初值,而定位精度与初值选择有关,在实现 SAR 图像自动实时定位时使用不够灵活。

除 Range-Doppler 定位模型之外,文献[8]采用直接定位方法对机载 SAR 图像进行定位,并对影响定位精度的主要误差因素进行定量分析.文献[9]研究在无地面控制点的情况下,利用和差波束 SAR 图像直接对地面目标进行定位,可获取地面目标 3 维坐标信息。

动态高精度定位导航设备的出现,使得现代机载 SAR 系统已能够提供足够多的遥测参数供图像定位使用,因此利用平台参数进行 SAR 图像的实时定位成为可能.利用机载定位导航设备,可以在雷达成像的同时,准确记录下平台瞬时的经纬度、航迹角、高度及速度等参数,这些参数是 SAR 图像定位中确定地面坐标点与像点位置关系的关键参数,通过解算可以直接将像点坐标变换为相应的地面点地理坐标。

本文提出一种针对机载 SAR 正侧视成像的图像无控制点直接定位方法,该方法从 SAR 图像的辅助数据中解算出平台经纬度、高度、航迹角、图像近距、侧视方向等参数,并依据 SAR 侧视成像时的距离向采样间隔,推算出 SAR 图像中任意像素点到机下点的距离,从而将 SAR 图像定位问题转换为:已知机下点的地理坐标和图像中目标点相对于机下点的距离与方位角,解算像素点的经纬度.这是已知椭球上两点间的距离和方位角情况下的大地主题解算问题,本文采用迭代优化方法,结合大地主题反算,可得到目标点的地理坐标。

## 1 直接定位方法原理

SAR 图像直接定位的基本思想是根据机载 SAR 正侧视成像几何关系,利用机载平台参数,实现对 SAR 图像的直接定位.正侧视情况下,SAR 对地面成像的基本几何关系如图 1 所示。

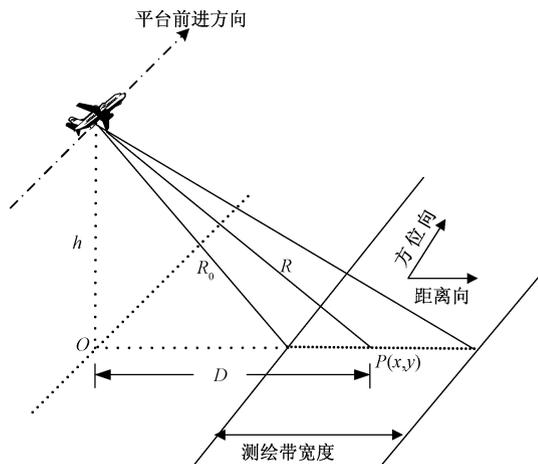


图 1 SAR 成像几何关系

Fig. 1 SAR imaging geometry

SAR 图像直接定位过程即是对 SAR 斜距图像中的任意一点  $P(x, y)$ , 根据 SAR 成像几何关系和平台参数,解算出其对应的经纬度坐标.如图 1 所示,测绘带近距点与载机之间的距离  $R_0$  可从 SAR 图像辅助参数中解算,  $R_0$  的计算是根据最小成像距离和斜距测量原理来推算的,由于 SAR 实际应用时存在系统延迟误差,从而影响斜距测量的精度,但是在进行多次斜距测量定标的情况下,系统延迟误差可确定,从而得到比较精确的  $R_0$  值.成像区域的海拔高度可从 DEM 数据中得到,在平坦地域,海拔高度可近似为常量,由地域海拔高度和机载传感器测量的平台海拔高度值可计算飞机离地高度  $h$ .机下点  $O$  的经纬度、平台航迹角、雷达侧视模式也可从 SAR 图像辅助参数中解算。

假设 SAR 斜距图像距离向像素分辨率(采样间隔)为  $m_x$ , 则图像上任意一点  $P(x, y)$  与雷达之间的距离  $R$  如下

$$R = R_0 + m_x \cdot x, \quad (1)$$

其中,  $x$  为图像中像素  $P(x, y)$  的横坐标.在作用距离和测绘带宽均较小的情况下,已知平台高度  $h$ , 图像中的点  $P(x, y)$  离平台的距离  $R$ , 则机下点  $O$  至点  $P(x, y)$  之间的距离可由勾股定理求

得.但是在作用距离和测绘带宽都比较大的情况下,则地球曲率的影响不可忽略,如图 2 所示,假设地球平均半径为  $r$ ,则由余弦定理,可求得  $O$  点和  $P(x,y)$  分别与地心的连线之间的夹角  $\theta$ ,如下

$$\cos\theta = \frac{(r+h)^2 + r^2 - R^2}{2 \cdot (r+h) \cdot r}, \quad (2)$$

由式(2)可求得机下点  $O$  至点  $P(x,y)$  之间的距离  $D = r \cdot \arccos\theta$ .

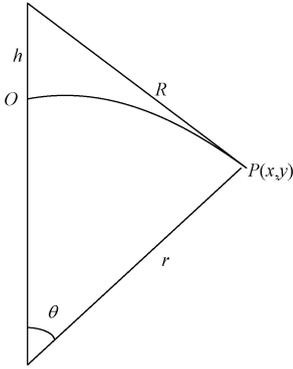


图 2 球面上两点之间距离

Fig. 2 Distance between two points on the earth

由以上分析可知,利用机载平台参数对 SAR 图像中的任意像素点  $P(x,y)$  进行定位的问题可转化为:已知机下点  $O$  的经纬度、 $O$  点与 SAR 图像中  $P(x,y)$  点之间的距离、 $P(x,y)$  相对于  $O$  点的方位角,求  $P(x,y)$  点的经纬度.其中  $P(x,y)$  相对于  $O$  点的方位角可以结合飞机平台航迹角和雷达侧视模式求得.

设  $O$  点经纬度为  $O(L_1, B_1)$ , 点  $P(x,y)$  相对于  $O$  点的方位角为  $a$ , 两点之间的距离为  $D$ , 则  $P(x,y)$  的经纬度初始值  $P(L_2, B_2)$  可由球面三角函数求得,如下

$$L_2 = L_1 + \arctg\left(\frac{\sin D \cdot \sin a}{\cos B_1 \cdot \cos D - \sin B_1 \cdot \sin D \cdot \cos a}\right), \quad (3)$$

$$B_2 = \arcsin(\sin B_1 \cdot \cos D + \cos B_1 \cdot \sin D \cdot \cos a). \quad (4)$$

式中所有的参量均已转化为弧度.式(3)、式(4)在假设地球为球体时成立,但实际的地球为椭球,因此式(3)、式(4)的计算结果与实际的经纬度值存在一定偏差.为了更精确地计算  $P(x,y)$  的经纬度值,需要结合大地主题反算公式,对得到的距离和方位角进行误差验证,并利用最优化方法降低定位误差.

Vincenty<sup>[10]</sup> 给出一组大地主题解算的反算公

式,若已知  $P_1$  和  $P_2$  点的大地坐标  $(L_1, B_1)$  和  $(L_2, B_2)$ , 由该组公式可计算  $P_1$  至  $P_2$  的大地线长  $S$  及其正反方位角  $A_{12}$  和  $A_{21}$ , 实验结果表明, Vincenty 公式适用于任意距离的大地主题反算,计算公式严密,具有很高的精度.

综上所述,基于机载平台参数的 SAR 图像无控制点定位方法实现步骤如下:

- 1) 针对机载 SAR 系统实时下传的 SAR 图像,对图像方位向的每一行解算其辅助数据,得到机下点经纬度、平台高度、航迹角、最小作用距离、工作模式、侧视方式等平台参数;
- 2) 由正侧视 SAR 成像几何与图像距离向采样间隔计算图像中的点  $P(x,y)$  与机下点之间的距离;
- 3) 设定距离和方位角误差容限以及最大迭代次数,按照图 3 所示流程进行迭代计算,得到图像上  $P$  点的经纬度值.

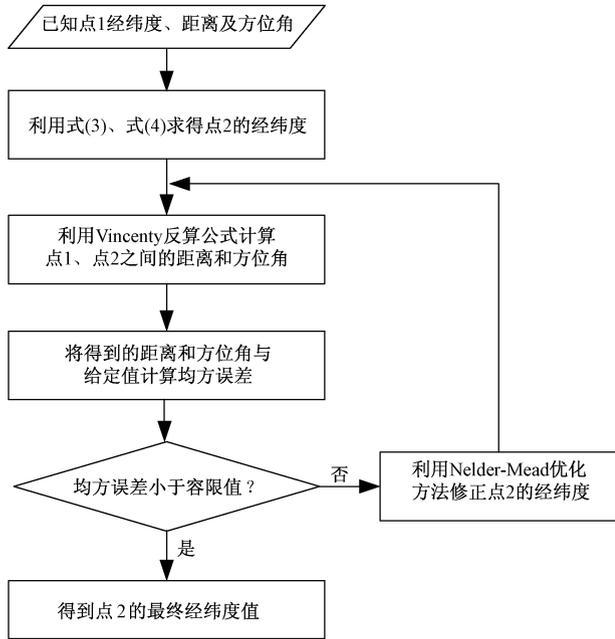


图 3 迭代计算经纬度流程图

Fig. 3 A flow chart for the iterative computation of longitude and latitude

Vincenty 反算公式可参考文献[10]. 迭代计算时采用了 Nelder-Mead 优化方法,它是一种被广泛使用的解决非线性无限制最优化问题的方法,具体实现可参考文献[11-12].

## 2 误差因素分析

由于 SAR 图像定位精度受限于机载系统相

关传感器的测量精度,SAR 图像定位误差是一个综合性误差.表 1 中列举的是影响机载 SAR 定位

精度的主要因素,通过对各误差因素的控制,可以有效提高 SAR 系统的实时定位精度.

表 1 机载 SAR 定位误差因素影响权重分析

Table 1 Weight analysis of impact factors which influence air-borne SAR localization precision

误差源	类型	权重等级	降低误差方法	
参数测量误差	平台位置测量误差	随机	●●●	提高导航定位系统测量精度
	平台高度测量误差	随机	●●	提高飞机平台测高精度
	地面高程测量误差	随机	●●	提高地面高程测绘精度
	航迹角测量误差	随机	●●●●	提高导航定位系统测量精度
	天线方位角误差	随机	●●●●	提高天线稳定平台数据采集及跟踪精度
	天线平台安装误差	标定	●●	改进制作工艺,提高安装精度
	斜距测量误差	标定	●●	提高距离定标精度
处理误差	定位模型误差	处理	●	定位模型引入地形因素影响
	平台地速	随机	●●●	依赖于飞机,提高空间有限
系统交联误差	数据采集同步误差	随机	●●	采用时间同步提高数据采集的时间精度
	飞行稳定性	随机	●●	依赖于飞机,提高空间有限

由表 1 所示的 SAR 图像定位误差因素影响权重可知,针对正侧视条带成像模式,影响较大的 2 个因素是航迹角测量误差和天线方位角误差,这 2 个误差因素均会导致 SAR 图像降质和目标方位角误差,可通过提高天线稳定平台的数据采集及跟踪精度减小天线方位角误差并提高图像质量,航迹角测量误差主要取决于惯导测速精度.下面通过实例仿真来分析惯导测速精度对定位精度的影响.

以规划航迹角等于 30°、雷达作用距离等于 25 km 为例,当地速从 20 m/s 到 60 m/s 变化时,惯导测速精度分别设定为 0.2 m/s 和 0.1 m/s 时,得到定位误差与地速的变化曲线分别如图 4(a)和图

4(b)所示.由图 4(a)可见,在作用距离固定情况下,定位精度与地速有关,地速值越小,则定位误差越大.当惯导测速精度等于 0.2 m/s、地速等于 20 m/s 时,仅此一项引入的图像定位误差即在 170 m 左右,如果考虑到其他误差因素(平台位置误差、高度测量误差、斜距测量误差、安装误差等)的影响,则定位误差将进一步加大.由图 4(b)可见,当惯导测速精度提高到 0.1 m/s 时,则定位误差可以明显改善,即使在较低的地速条件(20 m/s)下,由惯导测速精度引入的定位误差也不会超过 85 m.因此提高惯导测速精度是提高 SAR 图像定位误差的有效途径.

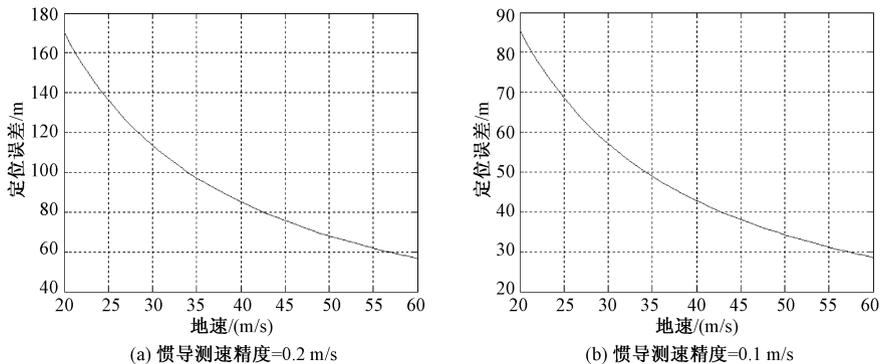


图 4 定位误差随飞机地速的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of localization error with ground speed

通常情况下,斜距测量误差和高程测量误差是耦合的,二者相互影响,在高程已知的情况下,斜距测量误差可通过定标达到较精确的补偿,这里通过实例仿真来分析高程测量误差对定位精度

的影响.以飞机距离地面的绝对高度 4 500 m、雷达作用距离分别等于 25 km 和 45 km 为例,当高度测量误差从 -100 m 到 100 m 变化时,得到定位误差随高度测量误差的变化曲线分别如图

5(a)和图5(b)所示.由图中可见,高度测量误差对定位误差的影响是线性的,且雷达作用距离越

远,高度测量误差的影响权重值越低.

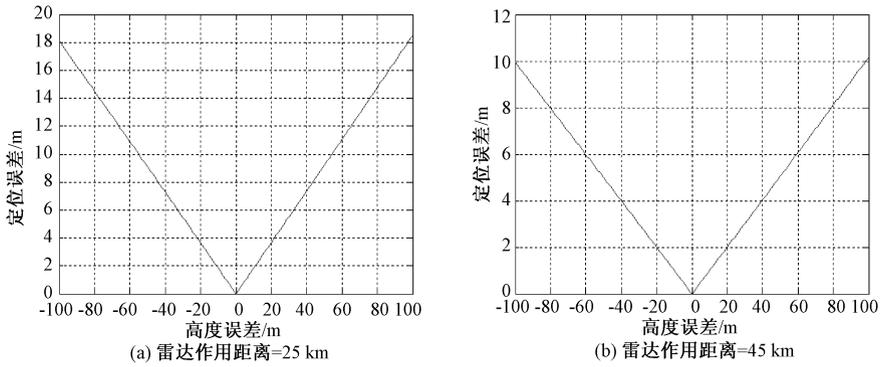


图 5 定位误差随高程误差的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of localization error with altitude error

### 3 数值试验结果

针对中国科学院电子学研究所研制的某型无人机载 SAR 系统获取的详查模式 SAR 图像做定位精度检验.雷达作用距离为 25 km,飞机飞行高度 5 000 m,飞行地速 48 m/s,正侧视条带成像,飞机平台的定位导航设备采用差分 GPS.针对含有辅助数据的原始 SAR 图像数据,在图像中选择 10 个定位点,定位点的地理坐标事先由差分 GPS 测量得到,按照第 2 节所描述的 SAR 图像无控制点定位实现步骤进行定位解算,得到定位点地理坐标的计算值.在未做系统误差补偿和有误差补偿的情况下,所得到的定位误差结果分别如

图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)和图 6(d)所示.

由图 6 可见,当补偿了斜距、高程及航迹角误差之后,定位误差会有明显的改善,圆概率误差可达到 10 m 以内.需要说明的是:斜距误差的补偿是通过测算雷达系统的距离延迟实现,高程误差的补偿是通过读取定位点的 DEM 数据实现,航迹角误差的补偿是通过多行 SAR 辅助数据中的航迹角求平均拟合真实航迹来实现,在飞机姿态较稳定的情况下,SAR 系统天线稳定平台具有较高的跟踪精度,使得天线方位角误差很小,由此引起的定位误差也很小.经过误差补偿之后得到的图像定位误差具有较高的精度,说明了本文定位算法的有效性.

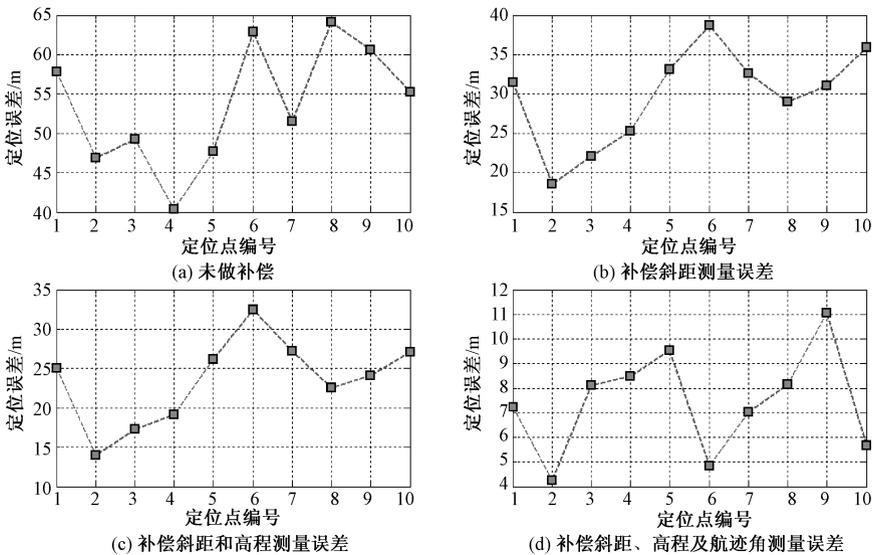


图 6 未补偿及补偿测量误差之后的定位结果

Fig. 6 Localization results before and after compensation for measurement errors

## 4 结束语

本文提出一种基于机载平台参数的 SAR 图像无控制点定位方法,该方法利用 SAR 图像辅助数据中的相关参数,将 SAR 图像定位问题进行简化,即已知机下点的地理坐标和目标点相对于机下点的距离与方位值,利用大地主题反算方法迭代优化解算目标点的经纬度;同时对影响定位精度的系统误差因素进行分析,给出在误差补偿条件下的无控制点定位精度试验结果.该方法充分利用了机载平台的遥测信息,将目标定位问题转换为大地主题解算问题,省去了坐标系转换的步骤,计算速度快,无须先验知识,可实现 SAR 图像在线实时定位.

对于地形起伏较大的成像区域,由于在图像中存在雷达侧视成像时所特有的透视收缩、叠掩等现象,导致斜距和高程测量误差较大,目前常用的方法是结合成像区域的 DEM 数据对 SAR 图像进行正射校正,以纠正地形起伏对目标定位的影响.本文方法以 SAR 正侧视成像几何模型为基础,对于斜视成像条件下的目标定位精度还需要进一步验证.

### 参考文献

[ 1 ] 尤红建,丁赤飏,付琨. SAR 图像对地定位的严密共线方程模型[J]. 测绘学报,2007,36(2) : 158-162.

- [ 2 ] Konecny G, Schuhr W. Reliability of radar image data [ C ] //16th ISPRS Con, Comm 3, 1988.
- [ 3 ] Curlander J C. Location of pixels in space-borne SAR imagery [ J ]. IEEE Tran on Geosciences and Remote Sensing, 1982, 20 ( 3 ) : 359-364.
- [ 4 ] Curlander J C, Kwok R, Pang S S. A post-processing system for automated rectification and registration of space-borne SAR imagery [ J ]. Int J Remote Sensing, 1987, 8(4) : 621-638.
- [ 5 ] Leberl F, Domik G, Kobrick M. Mapping with aircraft and satellite radar images [ J ]. Photogrammetric Record, 1985, 11(66) : 647-665.
- [ 6 ] 常本义,高力. IECAS 高分辨率机载合成孔径雷达几何精度试验 [ J ]. 电子与信息学报,2006,28(5) : 945-949.
- [ 7 ] 张笑微,张挺,王鑫,等. 无控制点条件下的 SAR 影像直接定位 [ J ]. 测绘通报,2012(增刊) : 359-361.
- [ 8 ] Pedlar D N, Coe D J. Target geolocation using SAR [ J ]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2005, 152(1) : 35-42.
- [ 9 ] 韦北余,朱岱寅,吴迪,等. 一种基于和差波束的机载 SAR 定位方法 [ J ]. 电子与信息学报,2013, 35(6) : 1464-1470.
- [ 10 ] Vincenty T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations [ J ]. Survey Review, 1975, 23(176) : 88-93.
- [ 11 ] Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization [ J ]. The Computer Journal, 1965, 7(4) : 308-313.
- [ 12 ] Lagarias J C, Reeds J A, Wright M H, et al. Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions [ J ]. SIAM Journal of Optimization, 1998, 9(1) : 112-147.