

# 缺少控制点的星载 SAR 遥感影像对地目标定位

袁修孝<sup>1</sup> 吴颖丹<sup>1</sup>

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

**摘 要:**从距离和多普勒方程出发,构建了无需地面控制点的直接对地目标定位模型,推导了缺少控制点时的精化轨道参数及成像几何参数等的数学模型。经过对北京某地区一景 ENVISAT ASAR 影像进行直接对地目标定位,获得了实地上±170.966 m(约±8.7 像素)的平面精度;利用单个地面控制点对星载 SAR 影像的定向参数实施调整后,对地目标定位平面精度提高到±54.665 m(约±2.8 像素),控制点数目增加到 4 个时,对地目标定位平面精度接近±2 像素。结果显示,对困难地区采用星载 SAR 遥感影像对地目标定位具有很好的应用前景。

**关键词:**星载合成孔径雷达;构像方程;目标定位;精度

**中图法分类号:**P237.3

合成孔径雷达(SAR)具有全天候、全天时的对地观测能力,在地形测绘、国土资源调查、农作物估产、水文监测和灾害评估等领域有着广阔的应用前景。利用 SAR 影像进行精确对地目标定位是一项关键技术<sup>[1,2]</sup>。然而,就中低分辨率星载 SAR 影像而言,由于斑点噪声的影响,控制点的识别比较困难。而且,在广阔的海域及人员难以通达的地区,获取符合要求的地面控制点非常困难。因此,研究缺少地面控制点情况下的星载 SAR 影像对地目标定位是非常必要的。

为了进行星载 SAR 影像的精确对地目标定位,建立 SAR 影像的构像方程是关键。现有的构像方程大体上可以分为以下 4 类:① 顿斯科夫提出的合成孔径雷达构像数学模型<sup>[3]</sup>,其理论较为严密,但形式太复杂。② 基于共线条件方程的数学模型,最先由 Konecny 在 1988 年国际摄影测量与遥感大会上提出<sup>[4]</sup>,文献[5]对其进行了论证并给出了用斜距表示的 SAR 影像数学模型。该类模型虽然用共线条件方程描述 SAR 影像的成像几何,但忽略了 SAR 距离投影的特点。③ 把 SAR 影像视为线阵列 CCD 扫描影像,直接采用行中心投影的数学模型<sup>[6]</sup>。由于行中心投影成像与 SAR 成像时的几何状态存在较大的差异,该模型只能作为一种近似 SAR 影像几何处理模型。

④ 基于距离-多普勒条件的数学模型,这是直接描述 SAR 成像的物理模型,由于充分顾及了 SAR 影像的成像特点而被广泛使用。在零多普勒频率下,根据 SAR 影像侧视成像原理建立的 Leberl 模型<sup>[7]</sup>就属于此类。

## 1 基于距离-多普勒条件方程的 SAR 影像定位模型

SAR 影像的成像几何关系可以由距离方程和多普勒频率方程来表达<sup>[8]</sup>。在雷达照射区域内,分布着等时延的同心圆束和等多普勒频移的双曲线束,同一回波时延的点目标具有不同的多普勒频移,但具有相同多普勒频移的点目标却具有不同的时延值。根据距离向的回波信号时延信息及方位向的多普勒频移信息,便可实施目标点的定位。

设  $\mathbf{R}_s = [X_s \ Y_s \ Z_s]^T$  和  $\mathbf{R}_p = [X \ Y \ Z]^T$  为卫星和地面点  $P$  的位置矢量,  $\mathbf{V}_s = [V_{x_s} \ V_{y_s} \ V_{z_s}]^T$  及  $\mathbf{V}_p = [V_x \ V_y \ V_z]^T$  为卫星和地面点  $P$  的速度矢量,  $(i, j)$  为地面点  $P$  在 SAR 影像上方方向和距离向的像素坐标,  $R_0$  为影像近距离端斜距,  $r$  为距离向像元大小。则雷达天线中心到地面点  $P$  的距离可以表示为:

$$R_{i,j} = |R_s - R_p| = R_0 + jr \quad (1)$$

由于卫星和地物的相对运动,目标点反射到雷达的电磁波频率会发生位移,位移量的大小正比于卫星和目标点的相对运动速度,其多普勒条件方程为:

$$f_D = -\frac{2(R_s - R_p)(V_s - V_p)}{\lambda |R_s - R_p|} \quad (2)$$

式中,  $f_D$  为多普勒频率;  $\lambda$  为雷达波长。

理想情况下,卫星在轨道上的飞行速度矢量与雷达天线到地面点矢量保持垂直,此时多普勒频率为零。在地心地固坐标系中,地面点  $P$  的速度  $V_P = 0$ 。

由于高空运行的卫星传感器受大气干扰很小,考虑到卫星轨道运行的平稳性,在一个短时间内,可用低阶多项式描述卫星的运行轨道,从而避免复杂的卫星受力分析。在一景 SAR 影像中,方位向每一行对应不同的卫星位置和速度矢量,可表示为成像时刻  $t$  的函数。当采用三次多项式拟合时,任意时刻的卫星状态矢量可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_s &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\ \mathbf{Y}_s &= b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \\ \mathbf{Z}_s &= c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 \\ \mathbf{V}_{sx} &= a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \\ \mathbf{V}_{sy} &= b_1 + 2b_2 t + 3b_3 t^2 \\ \mathbf{V}_{sz} &= c_1 + 2c_2 t + 3c_3 t^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $t$  为方位向像素坐标对应的成像时刻;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  ( $i=0,1,2,3$ ) 为卫星轨道拟合参数,可由影像头文件提供的卫星星历数据计算得到。

基于距离-多普勒条件的构像方程只能建立像点与对应地面点间的几何约束方程,对于单景星载 SAR 影像定位而言,为了求解地面点的三维坐标  $(X, Y, Z)$ , 必须引入 WGS84 地球椭球模型:

$$\frac{(X^2 + Y^2)}{(R_e + h)^2} + \frac{Z^2}{R_p^2} = 1 \quad (4)$$

式中,  $R_e$ 、 $R_p$  分别为 WGS 84 椭球的长半轴和短半轴;  $h$  为目标点的高程,一般取测区的平均高程值。

将式(3)代入式(1)和式(2)所得到的距离-多普勒条件方程中的参数包括  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 、 $R_0$  和  $r$ 。通常  $R_0$  和  $r$  可由 SAR 传感器设计参数直接给出,此时的参数仅为卫星轨道拟合系数。为了精确求解这些参数,需要有适量的地面控制点。由式(3)可知,所需的地面控制点数与式(3)的阶数密切相关。

### 1.1 无控制点的对地目标定位

当无地面控制点时,星载 SAR 影像的对地目

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{\bar{X}}{R} & -\frac{\bar{X}}{R}t & -\frac{\bar{X}}{R}t^2 & -\frac{\bar{X}}{R}t^3 & -\frac{\bar{Y}}{R} & -\frac{\bar{Y}}{R}t & -\frac{\bar{Y}}{R}t^2 & -\frac{\bar{Y}}{R}t^3 & -\frac{\bar{Z}}{R} & -\frac{\bar{Z}}{R}t & -\frac{\bar{Z}}{R}t^2 & -\frac{\bar{Z}}{R}t^3 \\ V_X & V_X t - \bar{X} & V_X t^2 - 2t\bar{X} & V_X t^3 - 3t^2\bar{X} & V_Y & V_Y t - \bar{Y} & V_Y t^2 - 2t\bar{Y} & V_Y t^3 - 3t^2\bar{Y} & V_Z & V_Z t - \bar{Z} & V_Z t^2 - 2t\bar{Z} & V_Z t^3 - 3t^2\bar{Z} \end{bmatrix};$$

标定位可按如下步骤进行<sup>[9]</sup>。

1) 根据卫星星历提供的若干时刻的卫星位置(一般在地心地固坐标系中)由式(3)的前三式解求轨道拟合系数  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ , 并从影像头文件中获取  $R_0$  和  $r$ ;

2) 根据提供的脉冲重复频率 PRF 得到每行 SAR 影像成像的时间间隔  $\Delta t = \frac{1}{\text{PRF}}$ ;

3) 根据像点坐标  $(i, j)$  计算其对应的成像时刻  $t = t_0 + (i-1)\Delta t$  ( $t_0$  为参考时刻), 进而由式(3)拟合得到该成像时刻所对应的卫星位置和速度矢量;

4) 联立式(1)、式(2)和式(4), 以地面点坐标  $(X, Y, Z)$  为未知数, 采用牛顿-辛普森算法迭代求解, 即可获得对应像点在 WGS84 坐标系中的地面坐标。

### 1.2 缺少地面控制点的对地目标定位

一般说来,卫星星历提供的轨道参数精度有限。当有地面控制点时,可对 SAR 成像的距离-多普勒条件方程中的参数进行精化。此时,需要对距离-多普勒条件方程进行线性化。考虑到大部分星载 SAR 影像一般满足零多普勒条件及其在地心地固坐标系中地物速度为零的条件,可将式(1)和式(2)表达的严格关系式改写为:

$$\begin{cases} F_1 = \sqrt{(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2} - (R_0 + jr) = 0 \\ F_2 = (X - X_s)V_x + (Y - Y_s)V_y + (Z - Z_s)V_z = 0 \end{cases} \quad (5)$$

若将  $F_1$ 、 $F_2$  视为虚拟观测值,将卫星轨道拟合参数  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  视为未知数,为顾及控制点本身的误差,将其坐标视为带权观测值,可对式(5)线性化,其矩阵形式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_1 = \mathbf{A}t + \mathbf{B}\mathbf{x} - l_1, \text{ 权 } \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{V}_c = \mathbf{E}_c\mathbf{x} - l_c, \text{ 权 } \mathbf{P}_c \\ \mathbf{V}_t = \mathbf{E}_t\mathbf{x} - l_t, \text{ 权 } \mathbf{P}_t \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{V}_1$ 、 $\mathbf{V}_c$ 、 $\mathbf{V}_t$  分别为  $F_1$ 、 $F_2$  虚拟观测值、控制点地面坐标和卫星轨道拟合参数虚拟观测值的改正数向量,  $l_1$ 、 $l_c$ 、 $l_t$  为对应误差方程的常数项;  $\mathbf{x} = [\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$  为控制点地面坐标未知数增量向量;  $\mathbf{t} = [\Delta a_0 \ \Delta a_1 \ \Delta a_2 \ \Delta a_3 \ \Delta b_0 \ \Delta b_1 \ \Delta b_2 \ \Delta b_3 \ \Delta c_0 \ \Delta c_1 \ \Delta c_2 \ \Delta c_3]^T$  为轨道拟合参数增量向量;

$B = \begin{bmatrix} \bar{X}/R & \bar{Y}/R & \bar{Z}/R \\ -V_X & -V_Y & -V_Z \end{bmatrix}$ ;  $E_x, E_i$  分别均为单位矩阵; 其中,  $(\bar{X} \ \bar{Y} \ \bar{Z})^T = (X \ Y \ Z)^T - (X_s \ Y_s \ Z_s)^T$ ;  $R = \sqrt{(X-X_s)^2 + (Y-Y_s)^2 + (Z-Z_s)^2}$  为斜距;

$P_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} E_i$  为第  $i$  类虚拟观测值的权矩阵,  $\sigma_0^2$  为单位权观测值的方差,  $\sigma_i^2$  为  $i$  类虚拟观测值的方差。为了正确给定各类观测值的权以确保平差的质量, 可从验后方差估计原理出发, 在每一次平差迭代计算后求出各类观测值的验后方差, 据此来自动修正前一次迭代中所确定的观测值的权。对于各类观测值的方差, 本文采用 Förstner 提出的近似方差估计公式计算:

$$\sigma_i^2 = \frac{V_i^T V_i}{r_i} \tag{7}$$

式中,  $r_i$  为第  $i$  类虚拟观测值的多余观测分量, 具体计算方法可参考文献[10]。

对式(6)可根据最小二乘平差原理计算轨道拟合参数的改正数, 从而实现对各参数的精化。在缺少地面控制点条件下, 参数的调整是一个秩亏平差问题, 需要通过给定未知数的权矩阵  $P_i$  来保证解的稳定性和精度[11]。

对轨道参数进行调整后, 便可根据修正后的轨道参数利用式(3)计算更新后的卫星位置和速度矢量, 进而按照 § 1.1 的流程实现对地目标的直接定位。

2 试验及其结果分析

为了验证本文方法的有效性, 这里选取北京地区的一景 ENVISAT ASAR 影像进行试验。该影像获取时间为 2004 年 4 月 28 日, 影像大小为 24 226 像素×5 176 像素, 覆盖区域地面最大高差可达 1 118 m, 但大部分区域属于丘陵地形(高程为 1 m ~ 304 m), 主要包含了河流、城市道路、建筑物和山体等特征。影像为 SLC 级斜距产品, 方位向像元大小为 4.05 m, 距离向像元大小为 7.80 m, 入射角为 23.99°, 故地距像元大小约 19.2 m = 7.8/sin(23.99°) m。在 GoogleEarth 专业版上选取了 43 个分布较均匀的明显地物点, 并获取了它们的三维地面坐标(精度估计在 10 m 左右), 以用作检查点来评价对地目标定位的精度。

首先, 根据影像头文件信息利用三次多项式拟合卫星轨道参数, 并实施无地面控制的直接对

地目标定位。然后, 利用单个地面控制点对局部定向参数进行调整后实施对地目标定位。分别将其计算出的地面坐标与检查点坐标转换到高斯-克吕格坐标系, 并进行比较, 对其残差进行统计, 详细结果列于表 1。图 1 显示了两种定位方法检查点的位置残差分布图。

表 1 SAR 影像直接对地目标定位结果

Tab. 1 Object Location Results Based on ENVISAT ASAR Imagery

	无控制点/m			单个控制点/m		
	X	Y	平面	X	Y	平面
最大残差	273.987	86.668	287.368	127.122	62.146	141.500
最小残差	35.313	0.4526	35.316	0.859	0.433	0.962
中误差	168.794	27.167	170.966	49.761	22.630	54.665

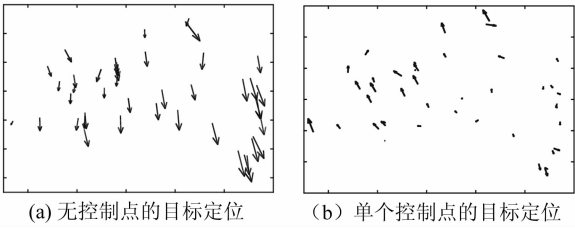


图 1 检查点平面位置残差图

Fig. 1 Residuals of Planimetric Position of Check Points

同时, 本文通过增加用于精化卫星轨道拟合参数的控制点个数来分析其对目标定位精度的影响。图 2 为分别利用 0~10 个地面控制点调整距离-多普勒参数后对地目标定位精度的变化趋势。

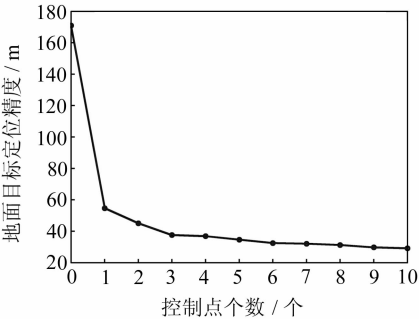


图 2 控制点对地面目标定位精度的影响

Fig. 2 Accuracy Curve of Object Location of ENVISAT SAR with GCPs

通过分析表 1 结果可以得出如下结论。

1) 从表 1 可以发现, 卫星星历数据存在的误差和近似的地球椭球模型描述, 使无地面控制点的 SAR 影像直接对地目标定位精度较低,  $X$ 、 $Y$  方向的中误差分别为 ±168.794 m 和 ±27.167 m, 约为 ±8.8 像素和 ±6.7 像素, 平面定位精度为 ±170.966 m, 与其手册中标称的 200 m 左右的绝对定位精度[12]是相符的。这也验证了本文无地面控制直接对地目标定位的计算是完全正确

的。从图 1(a)所示的残差分布图可知,目标定位误差存在很强的系统性。

2) 当利用单个地面控制点对 SAR 构像方程的局部参数进行调整后,直接对地目标定位精度有了很大的提升。 $X$  方向精度提高了  $70.52\% = (168.794 - 49.761)/168.794$ ,达到  $\pm 49.761$  m,约  $\pm 2.6$  像素; $Y$  方向精度提高了  $16.70\% = (27.167 - 22.630)/27.167$ ,为  $\pm 22.630$  m,约  $\pm 5.6$  像素;平面位置精度提高了  $68.03\% = (170.966 - 54.665)/170.966$ ,达到了  $\pm 54.665$  m。究其原因,主要是消除了卫星星历中的平移系统误差  $a_0$ 、 $b_0$  和  $c_0$ ,图 1(b)很好地揭示了这一点,检查点的坐标不再存在系统误差。

3) 从图 2 可以看出,利用单个地面控制点精化 SAR 构像参数后,对地目标定位精度提升幅度是最大的,此时目标定位精度从无地面控制时的  $\pm 170.966$  m 一跃而为  $\pm 54.665$  m。不过,在缺少地面控制点的情况下,参数的选择对目标定位精度具有明显的影响。当选择  $a_0$ 、 $b_0$ 、 $c_0$  3 个参数时,目标定位精度改善的幅度是最大的;而选择  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  3 个参数时,结果改善不明显。由于  $a_0$ 、 $b_0$ 、 $c_0$  是卫星位置的主分量,而  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  是卫星运行速度的主分量。卫星测控过程中,速度的测量精度比较高,卫星位置一般存在比较严重的平移误差。这也是可以利用较少的地面控制点就能精化 SAR 影像的构像参数、较好地改善对地目标定位精度的主要原因。但随着控制点数的增加,对地目标定位精度的改善是相当有限的。当地面控制点由 1 个增加到 10 个时,目标定位精度的变化不超过  $\pm 26$  m。事实上,当地面控制点数超过 4 个时,对地目标定位精度基本上是一致的。

4) 当利用 4 个以上地面控制点时,对地目标定位精度可达到  $\pm 2$  像素,但不会随着控制点的增加而显著提高。究其原因就在于,一是地球模型不精确。由于无法得到该地区精确的 DEM 数据,仅取用了测区的平均高程,高程误差对定位精度有较大的影响;二是本文的控制点是从 GoogleEarth 上选取的,其精度只能达到  $\pm 10$  m,且在 SAR 影像上人工难以精确识别控制点,其量测误差对定位结果亦存在较大的影响。

### 3 结 语

通过对一景 ENVISAT ASAR 斜距影像的

试验表明,仅利用卫星轨道参数和成像物理参数的 SAR 影像直接对地目标定位结果带有明显的系统误差,只能达到  $\pm 170.966$  m(约  $\pm 8.7$  像素)的定位精度。当加入一个地面控制点,对部分成像几何参数进行调整时,目标定位精度可以提高  $68.03\%$ ,达到了  $\pm 54.665$  m(约  $\pm 2.8$  像素)。但当控制点数目达到 4 个时,定位精度不会随控制点数的增加而明显地提高。

### 参 考 文 献

- [1] 尤红建,丁赤彪,向茂生. 机载高分辨率 SAR 图像直接对地定位原理及精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(8):712-715
- [2] 黄国满,岳昔娟,赵争,等. 基于多项式正射纠正模型的机载 SAR 影像区域网平差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(6):569-572
- [3] 顿斯科夫. 雷达摄影测量[M]. 周广森译. 北京:测绘出版社, 1984
- [4] Konecny G, Schuhr W. Reliability of Radar Image Data[C]. The 16th ISPRS Congress, Tokyo, 1988
- [5] 肖国强. SAR 影像纠正的数学模型[J]. 测绘学院学报, 1994, 11(3):175-180
- [6] 肖国超,朱彩英. 雷达摄影测量[M]. 北京:地震出版社, 2001
- [7] Leberl F. Radargrammetric Image Processing [M]. Norwood, MA: Artech House, 1990
- [8] Curlander J C. Location of Spaceborne SAR Imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1982, 2(3):359-364
- [9] 杨杰,潘斌,李德仁,等. 无地面控制点的星载 SAR 影像直接对地定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(2):144-147
- [10] 李德仁,袁修孝. 误差处理与可靠性理论[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002
- [11] 陶本藻. 自由网平差与变形分析[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社, 2001
- [12] European Space Agency. ENVISAT ASAR Product Handbook [M/OL]. <http://envisat.esa.int/dataproducts/asar/CNTR.htm>. Issue1.1.1, 2002

**第一作者简介:**袁修孝,教授,博士,博士生导师。主要从事航空航天摄影测量高精度定位理论与方法、高分辨率卫星遥感影像几何处理等的研究与教学工作。代表成果:GPS/IMU 辅助空中三角测量等。已出版专著 1 部、合著 5 部,发表学术论文 100 余篇。E-mail: yxxqxhyw@public.wh.hb.cn

(下转第 96 页)