

# SAR 图像立体定位原理与精度分析\*

周月琴 郑肇葆 李德仁 舒 宁

(武汉测绘科技大学信息工程学院 武汉 430070)

**摘 要** 本文在导出 SAR 图像成像方程式的基础上提出了 SAR 立体定位的原理和方法,并从理论上分析了影响 SAR 立体定位的主要因素。实验结果表明,本文提出的立体定位方法是正确的,影响定位精度的主要因素是交会角的大小与距离向量测误差,其与理论分析模型一致。

**关键词** SAR 图像,成像方程式,立体定位,理论精度分析

## 1 前 言

合成孔径侧视雷达(SAR)是一种工作在微波波段的能够以图像形式显示目标特征的成像雷达系统。把 SAR 装载在卫星、航天飞机、航空飞机等航天、航空飞行器上,将微波脉冲发射向地球表面,地面目标将部分后向散射回波反射回雷达天线。将这些回波能量信号记录下来,经过处理,产生清晰的表达地表特征的雷达影像。这种成像方式具有全天候、全天时数据获取能力,对一些地物具有穿透性;对一些多云、多雾、多阴雨以及多植被覆盖等困难地区的测图,具有光学摄影机和光电传感器无法比拟的优越性。

应用 SAR 影像进行三维地形测量的方法主要有两种: SAR 立体测量和干涉雷达(InSAR)。研究表明,使用重复轨道的 InSAR,是获得地表 DEM 的一个很好的途径。然而,使用 InSAR 技术时必须满足严格的几何条件,即基线要尽可能的小;轨道重复周期内同一地区地表特征不发生变化。这些条件限制了 InSAR 技术的应用,而普通的 SAR 立体测量却不需要满足这些条件。因此,SAR 立体测量仍不失为获取 DEM 的一个重要途径。

SAR 立体测量可以在解析测图仪上进行,也可以用数字摄影测量的方法来实现,后者主要包括同名像点量测和解析立体定位两个方面的问题。同名像点的量测可以借助于立体观察装置在高分辨率的图像显示屏上由人工量测,也可以用计算机进行自

动影像匹配。本文着重讨论雷达影像的解析定位原理及影响解析定位精度的因素。

## 2 SAR 图像的解析立体定位原理

### 2.1 SAR 图像的成像原理与成像方程式

SAR 图像的成像原理是:向飞行平台进行的垂直方向的一侧或两侧发射微波,把从目标返回的后向散射波以图像的形式记录下来,并按照回波返回的时间顺序排列,构成一条距离扫描线;通过平台的前进,扫描面在地表面移动,实现方位向扫描,获得



图 1 SAR 成像几何关系

图中:  $H$  为航高,  $R_0$  为扫描延迟;  $r_0$  为扫描延迟在图像上的投影;  $R$  为地面点  $P$  到天线中心的斜距;  $x$  为斜距显示的  $P$  点在图像上的像点坐标;  $\lambda_x$  为距离向比例尺

Fig.1 SAR imaging geometry

一系列扫描线,由若干条距离扫描线构成一幅 SAR

\* 本文得到国家自然科学基金重点基金和青年基金的资助。

收稿日期: 1997-08-26; 收到修改稿日期: 1998-06-28

影像。由此可知,雷达图像是地面的距离投影,通常有斜距显示和地距显示两种形式。斜距显示的雷达图像记录了目标点到天线的斜距,地距显示的雷达图像记录了目标点到天线的水平距离,其成像几何关系如图 1。

国内外关于 SAR 图像成像方程式的表达主要有两种形式,一种是用距离条件和多普勒条件方程来表达像点、目标点和雷达天线中心三者之间的坐标关系<sup>[1,2]</sup>;另一种是仿照摄影测量中贯用的共线方程来表达 SAR 图像成像方程式<sup>[3],1)</sup>。文献 [1] 介绍了利用 ERS-1 影像,根据距离和多普勒方程及卫星提供的轨道参数,进行立体定位的方法。然而,轨道参数往往是很难得到的,需要根据控制点反求。为便于利用与摄影测量中常用的空间后方交会原理解求轨道参数,本文采用后一种形式。下面从等效线中心投影出发推导 SAR 图像的成像方程式。

前已叙及,在每一个天线位置上得到的是一条距离扫描线影像,这种距离投影不同于 CCD 线阵列中心投影的几何关系。然而,若地面为平坦,这种距离投影很容易转换为线中心投影。

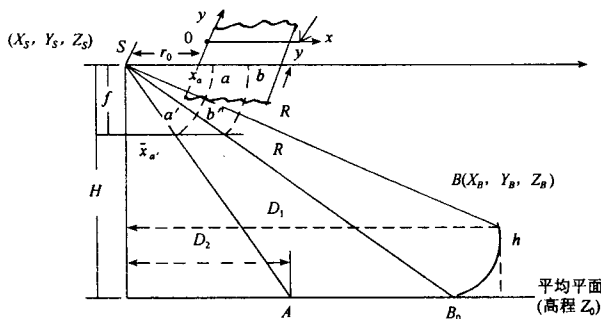


图2 距离投影与中心投影的转换

Fig.2 Transformation between the range projection and the central projection

如图 2 所示,设高程为  $Z_0$  的地平面上任意一地面点  $A$  在斜距显示 SAR 图像上的像点为  $a$ ,像点坐标为  $x_a$ ;而  $A$  点在等效的以  $f$  为焦距的线中心投影影像上的像点为  $a'$ ,相应的像点坐标为  $\bar{x}_a$ ,则  $x_a$  与  $\bar{x}_a$  满足

$$\bar{x}_a = \sqrt{(r_0 + x_a)^2 - f^2} \quad (1)$$

式中: $r_0$  为影像上的扫描延迟; $f$  为等效焦距。

这时,天线中心  $S$ 、像点  $a'$ 、地面点  $A$  严格满足共线关系。因此,当地面平坦时,SAR 图像的成像方

程式可表达为:

$$\begin{aligned} & \sqrt{(r_0 + x_a)^2 - f^2} = \\ & -f \frac{a_1(X_A - X_S) + b_1(Y_A - Y_S) + c_1(Z_0 - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_0 - Z_S)} \\ & 0 = \\ & -f \frac{a_2(X_A - X_S) + b_2(Y_A - Y_S) + c_2(Z_0 - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_0 - Z_S)} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $(X_A, Y_A, Z_0)$  为地面点坐标;  $(X_S, Y_S, Z_S)$  为  $a$  点所在扫描线对应的天线中心的地面坐标;  $a_1, a_2, a_3, \dots; c_3$  为该扫描线姿态参数  $\varphi, \omega, \kappa$  构成的方向余弦。

其中,  $X_S, Y_S, Z_S, \varphi, \omega, \kappa$  合称为该扫描线的外方位元素,可表示成像幅中心扫描线外方位元素  $X_{S0}, Y_{S0}, Z_{S0}, \varphi_0, \omega_0, \kappa_0$  及外方位元素变化量的函数:

$$\left. \begin{aligned} X_S &= X_{S0} + y \cdot dX_S + \dots \\ Y_S &= Y_{S0} + y \cdot dY_S + \dots \\ Z_S &= Z_{S0} + y \cdot dZ_S + \dots \\ \varphi &= \varphi_0 + y \cdot d\varphi + \dots \\ \omega &= \omega_0 + y \cdot d\omega + \dots \\ \kappa &= \kappa_0 + y \cdot d\kappa + \dots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $dX_S, dY_S, dZ_S, d\varphi, d\omega, d\kappa$  称为外方位元素随时间的变化量; $y$  为  $a$  点所在扫描线到中心扫描线的距离,即  $a$  点在整幅图像上  $y$  方向的像片坐标。

当地面不平坦时,设任意一点  $B$  相对于平均平面有高差  $h$ ,  $B$  点在斜距 SAR 影像和等效线中心投影影像上的像点分别为  $b, b'$ 。按距离投影的成像几何,所有到天线中心的斜距相等的地面点,包括平均平面上的  $B_0$ ,它们在 SAR 图像上的构像重合在一起,这就是所谓的透视收缩变形。这时  $S, b', B_0$  满足 (2) 式的共线关系。而  $B_0$  点的地面坐标与  $B$  点的地面坐标之间存在下面的转换关系:

$$\left. \begin{aligned} (X_{B_0} - X_S) &= \rho (X_B - X_S) \\ (Y_{B_0} - Y_S) &= \rho (Y_B - Y_S) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中,

$$\rho = \frac{D_2}{D_1}$$

称为修正系数。

根据 (2) 式和 (4) 式,得到任意地面点的成像方

1) 郑仲品. SAR 图像与光学图像的综合处理. 郑州测绘学院硕士论文, 1993.

程:

$$\left. \begin{aligned} &\sqrt{(r_0 + x)^2 - f^2} = \\ &-f \frac{a_1 \rho (X - X_S) + b_1 \rho (Y - Y_S) + c_1 (Z_0 - Z_S)}{a_3 \rho (X - X_S) + b_3 \rho (Y - Y_S) + c_3 (Z_0 - Z_S)} \\ 0 = & \\ &-f \frac{a_2 \rho (X - X_S) + b_2 \rho (Y - Y_S) + c_2 (Z_0 - Z_S)}{a_3 \rho (X - X_S) + b_3 \rho (Y - Y_S) + c_3 (Z_0 - Z_S)} \end{aligned} \right\} (5)$$

式中各符号的含义同(1)式和(2)式的说明。

### 2.2 SAR 图像的立体定位原理

获取 SAR 立体图像有两种途径:同侧立体和异侧立体(图 3(a)、(b))。基于成像方程式(5)可以借助于空间后方交会—空间前方交会过程来实现 SAR 图像的解析立体定位。

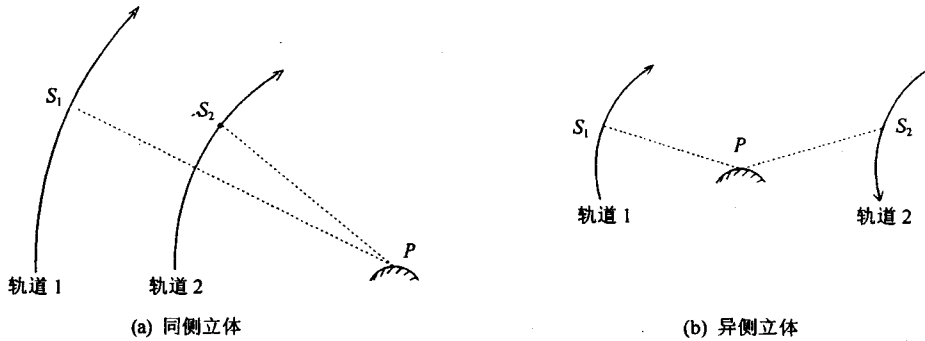


图3 立体像对获取模式

Fig.3 Imaging mode for stereo-pair images

SAR 图像的空间前方交会算法,其原理阐述如下。

现以同侧立体为例,设待定点 P 在左右图像上的像点分别为  $p_1, p_2$ , 对应的天线中心分别为  $S_1, S_2$ ; P 点在平均平面上相对于  $S_1, S_2$  的等距离点分别为  $P_1, P_2$ , 即  $|\bar{S}_1 \bar{P}_1| = |\bar{S}_1 \bar{P}| = R_1, |\bar{S}_2 \bar{P}_2| =$

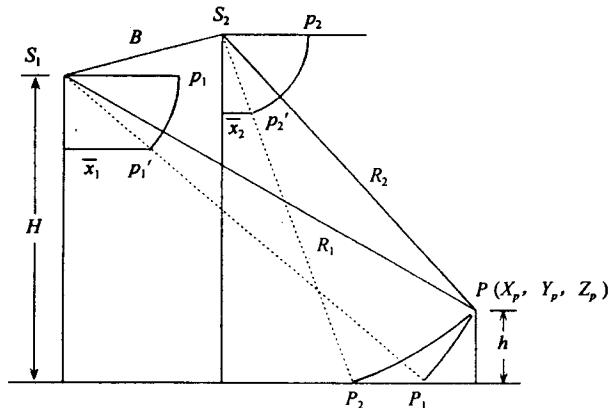


图4 SAR图像空间前方交会

Fig.4 Space forward-resection of the SAR imagery

空间后方交会是根据一定数量的、已知地面点坐标和相应像点坐标的控制点分别计算左右图像对应(5)式中的参数:扫描延迟( $r_0$ )、等效焦距( $f$ )、中心扫描线外方位元素( $X_{S0}, Y_{S0}, Z_{S0}, \varphi_0, \omega_0, \kappa_0$ )以及外方位元素的变化量( $dX_S, dY_S, dZ_S, d\varphi, d\omega, d\kappa \dots$ )。所有这些参数合称为方位参数,其计算原理和方法类似于 SPOT 卫星 CCD 线阵列图像<sup>[4]</sup>。

已知左右图像的方位参数之后,根据待定点在左右图像上的像点坐标,利用公式(5)计算待定点地面坐标,是一个空间前方交会的问题。然而,由于公式(5)是相对于平均平面上的点列出的成像方程,即公式中只包含平均平面的高程,而不包含待定点的实际高程,因此,传统的空间前方交会算法不能直接应用于 SAR 图像。为此,本文提出一种

$|\bar{S}_2 \bar{P}_2| = R_2$ , 如图 4 所示。欲求待定点 P 的三维空间坐标,分以下两步进行。

第一步,计算距离  $R_1, R_2$ 。首先,利用 SAR 成像方程式(5)的反算式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho(X - X_S)}{(Z_0 - Z_S)} &= \frac{a_1 \sqrt{(r_0 + x)^2 - f^2} - a_3 f}{c_1 \sqrt{(r_0 + x)^2 - f^2} - c_3 f} \\ \frac{\rho(Y_B - Y_S)}{(Z_0 - Z_S)} &= \frac{b_1 \sqrt{(r_0 + x)^2 - f^2} - b_3 f}{c_1 \sqrt{(r_0 + x)^2 - f^2} - c_3 f} \end{aligned} \right\} (6)$$

令  $\rho = 1$ , 分别计算出  $P_1, P_2$  点的地面坐标 ( $X_{P1}, Y_{P1}, Z_0$ ) 和 ( $X_{P2}, Y_{P2}, Z_0$ ); 然后按距离方程

$$R^2 = (X - X_S)^2 + (Y - Y_S)^2 + (Z - Z_S)^2 \quad (7)$$

分别代入  $P_1, S_1$  和  $P_2, S_2$  的地面坐标,计算出  $R_1, R_2$ 。

第二步,联立求解距离方程:

$$\left. \begin{aligned} R_1^2 &= (X_P - X_{S1})^2 + (Y_P - Y_{S1})^2 + (Z_P - Z_{S1})^2 \\ R_2^2 &= (X_P - X_{S2})^2 + (Y_P - Y_{S2})^2 + (Z_P - Z_{S2})^2 \end{aligned} \right\} (8)$$

以及(6)式,即可求出待定点 P 的地面坐标 ( $X_P, Y_P,$

$Z_p$ )。

上述针对同侧立体模式讨论的结果同样适用于异侧立体模式。

### 2.3 理论精度分析模型

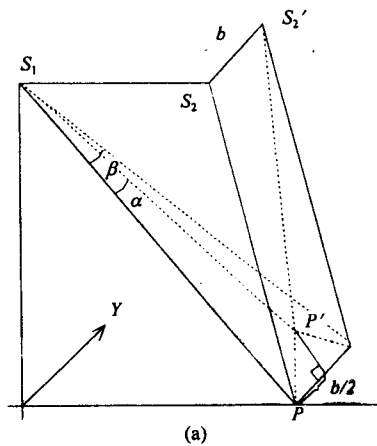
由上述 SAR 立体定位原理可知,影响地面点坐标计算精度的因素主要包括方位参数的精度和同名点像点坐标量测精度两个方面,其中,方位参数的计算精度取决于控制点坐标的量测精度。为简便起见,假定方位参数是正确的,下面讨论同名点坐标量测误差对定位精度的影响。

利用影像相关的算法,由计算机自动进行同名像点坐标的量测过程,是以一张像片上的像点为基准,寻找它在另一张像片上的像点位置,即可认为,作为基准的像点(通常称为目标点)无量测误差。为此,假定左像点无误差,在右像片上寻找出来的同名像点相对其正确位置存在方位向(y方向)和距离向(x方向)的量测误差。

#### 方位向量测误差的影响

由(3)式可知,方位向量测误差主要影响右图像天线中心的位置,如图 5(a)所示。设左像点天线中心为  $S_1$ ,右像点正确位置对应的天线中心为  $S_2$ ,错误位置对应的天线中心为  $S_2'$ ,当距离向无误差时,可认为求出的距离  $R_1$ 、 $R_2$  不变。此时,地面交会点由  $P$  点变为  $P'$  点。为简便起见,假定两轨道平行,且沿 Y 轴方向飞行,而天线中心  $S_2'$  位置误差在 X、Z 方向分量忽略不计。则由图 5(a)可得:

$$|P' - P| = \left(\frac{b}{2}\right) / \cos\alpha \quad (9)$$



其中,  $b$  为  $S_2$  到  $S_2'$  的距离,取  $\left(\frac{b}{2}\right)$  是因为在计算  $Y_p$  坐标时取均值的缘故;  $\alpha < \beta$ , 而  $\beta = \arctg \frac{b}{R_1}$ 。一般来说,  $b \ll R_1$ , 则  $\alpha$  是小角度。因此,由(9)式可以看出,方位向量测误差对定位结果的影响成线性关系。

#### 距离向量测误差的影响

距离向量测误差直接影响计算出的斜距  $R_2$ , 如图 5(b)所示。设由正确的斜距  $R_1$ 、 $R_2$  得到的交会点为  $P$ , 距离向量测误差导致右斜距产生  $dR$  的误差, 使得交会点由  $P$  点变为  $P'$  点。则由图 5(b)可得:

$$\Delta S = |P' - P| = \frac{dR}{\sin\theta} \quad (10)$$

式中,  $\theta$  为两条距离线  $R_1$ 、 $R_2$  的交会角,其表达式为:

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{R_1^2 + R_2^2 - B^2}{2R_1R_2} \right) \quad (11)$$

这里,  $B$  为天线中心  $S_1$  与  $S_2$  之间的距离,称为基准。

比较(9)、(10)两式不难看出,距离向量测误差比方位向量测误差对定位精度的影响要显著,特别是当交会角为小角度时,一个很小的距离误差,会产生很大的定位误差,例如,  $\theta = 5.5^\circ$ ,  $dR = 3.9$  m 时,  $\Delta S = 40.7$  m。

将  $\Delta S$  分解在平面和高程两个方向上,则得到平面和高程误差为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_{xy} &= \Delta S \cdot \cos\alpha \\ \Delta S_z &= \Delta S \cdot \sin\alpha \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中,  $\alpha$  为偏天底角,如图 5(b)所示。当  $\alpha = 45^\circ$  时,

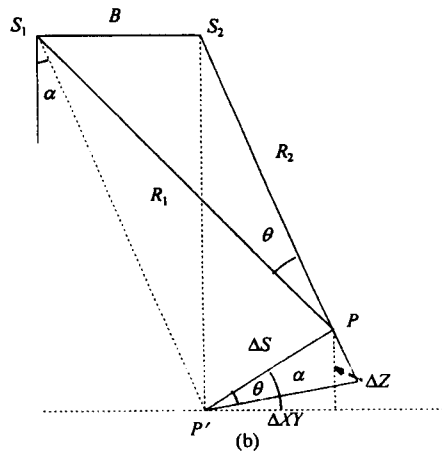


图5 像点坐标量测误差对定位结果的影响

(a) 方位向量测误差的影响; (b) 距离向量测误差的影响

Fig.5 Effect of measuring errors of image points for stereo-pair positioning results

$\Delta S_{xy} = \Delta S_z = \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta S$ ;  $\alpha > 45^\circ$  时, 定位误差主要表现在高程方向上; 当  $\alpha < 45^\circ$  时, 定位误差主要表现在平面上, 如图 6 所示。

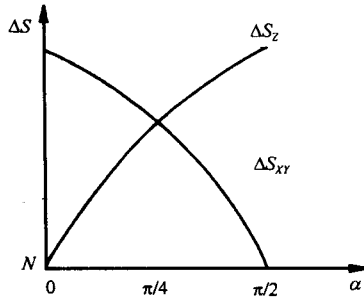


图6 定位误差分解

Fig.6 Decomposition of positioning errors

从(10)式还可以看出, 量测误差相同时, 交会角越大, 交会精度越高, 当  $\theta = 90^\circ$  时, 交会精度最高, 从这一点来说, 异侧立体交会精度高于同侧立体。

然而, 众所周知, 雷达图像的斜距投影方式决定了当地面有起伏时, 会产生透视收缩甚至顶底位移等图像失真<sup>[5]</sup>, 而且当偏天底角越小时, 这种失真现象越严重。另外, 雷达图像还会产生因地形起伏引起的雷达阴影<sup>[5]</sup>, 对于同侧立体, 左右影像产生阴影的程度不一样, 而对异侧立体, 产生阴影的情况会相反, 亦即在一幅影像上产生阴影的地方, 而在另一幅影像上则不是阴影。所有这些失真现象对同名像点的自动量测甚至是人工识别都是极为不利的, 势必会影响量测精度。

综上所述, 从理论上说, 在量测误差相同的情况下, 异侧立体定位精度比同侧立体高, 而且偏天底角越小越利用高程定位, 但此时雷达图像上存在的失真不利于同名像点的量测, 导致量测精度降低, 从而降低定位精度。由此可以看出, 两者是相互矛盾的。所以, 用雷达图像进行立体定位时, 对雷达图像的质量、立体构形(即交会角大小)的要求比对其它传感器图像的要求更高。

### 3 实验及结果分析

作者利用广东某地区一个航空 SAR 立体像对进行了实验。在像对的重叠部分选取 30 个明显地物点, 在计算机屏幕上目视量测其左右影像坐标, 并在 1:1 万地形图上判读出相应地物点, 读取地面坐标, 作为实验用的已知数据, 以验证本文方法的正确性。另外, 作者还按该像对的构像模式设计了模拟

数据, 通过设计不同的基线或给定不同的量测误差, 以验证理论精度分析模型(9)、(10)、(12)式的合理性。

(1) 表 1 和表 2 的数据说明, 本文提出的理论精度分析模型是合理的。

表 1 中, 情形 1 是指在右像点坐标的距离向和方位向同时加随机量测误差, 情形 2 为仅在方位向加随机误差; 情形 3 为仅在距离向加随机误差。  $\sigma = 0$  表示不加随机误差;  $\sigma = \pm 1$  像元, 表示加 1 个像元随机误差, 其余类推。由表 1 中的数据可以看出, 对情形 2, 随着量测误差的增加, 定位精度没有明显的变化; 而对情形 1 和 3, 随着量测精度的降低, 定位精度急剧下降, 而且这两种情形下的定位精度基本相同, 这说明距离向量测误差是影响精度的主要因素。

表1 像点坐标量测误差对定位精度影响  
Table 1 Effect of measuring errors of image points for the positioning accuracy

情形 量测 精度 误差	情形1: 距离向、 方位向均加误差			情形2: 方位向加 误差			情形3: 距离向加 误差		
	$\Delta S_{xy}$	$\Delta S_z$	$\Delta S$	$\Delta S_{xy}$	$\Delta S_z$	$\Delta S$	$\Delta S_{xy}$	$\Delta S_z$	$\Delta S$
$\sigma=0$	2.30	7.48	7.83	2.30	7.48	7.83	2.30	7.48	7.83
$\sigma=\pm 1$ 像元	15.74	43.68	46.43	2.86	7.69	8.20	15.41	43.20	45.87
$\sigma=\pm 2$ 像元	32.03	84.45	90.32	4.26	7.93	9.00	31.36	83.48	89.18
$\sigma=\pm 3$ 像元	48.38	125.50	134.50	5.94	8.19	10.12	47.37	124.04	132.78

注: 共使用30个点, 以均方根误差表示; 平均交会角为  $5.5^\circ$ ; 平均偏天底角为  $69.6^\circ$ 。

表2 不同交会图形与定位精度的关系  
Table 2 Relationship of between different resection configurations and positioning accuracies

交会图形	情形 定位精度	距离向加 $\pm 2$ 像元的量测误差		
		$\Delta S_{xy}$	$\Delta S_z$	$\Delta S$
平均基线 $B=2764$ , 平均交会角 $\theta=5.515^\circ$		21.99	54.83	59.08
$B=4777, \theta=8.391^\circ$		13.16	34.61	37.03
$B=6795, \theta=10.661^\circ$		10.26	27.95	29.77
$B=8832, \theta=12.492^\circ$		9.47	22.51	24.42

另外, 表 1 的原始数据是按实际 SAR 立体对的参数设计的, 平均交会角约为  $5.5^\circ$ , 偏天底角约为  $69.6^\circ$ , 按照这一交会图形, 对于在计算模拟像点坐标时产生的约为 0.2 个像元(此处 1 个像元相当于 3.9m 的距离误差)的四舍五入中误差, 根据公式(10)和(12), 计算出  $\Delta S = 8.12m$ ,  $\Delta S_{xy} = 2.83m$ ,  $\Delta S_z = 7.61m$ , 与表 1 中  $\sigma = 0$  时的结果非常接近; 同样, 当  $\sigma = \pm 1$  时, 实际上隐含 1.2 个像元量测误差, 计算出  $\Delta S = 48.69m$ ,  $\Delta S_{xy} = 16.97m$ ,  $\Delta S_z = 45.64m$ , 这与表中  $\sigma = \pm 1$  像元的结果也基本一致, 不难得

到,当 $\sigma = \pm 2$ 和 $\sigma = \pm 3$ 像元时,也有同样的规律。

上述结果分析表明,(10)式和(12)式作为理论精度分析模型是合理的。

表 2 的数据表明,对相同的量测误差,基线越长,即交会角越大,定位精度越高,这进一步证明了(10)式的合理性。同时也说明,影响定位精度的另一个主要因素是交会角的大小。交会角越大,定位精度越高。

(2)表 3 的数据表明,本文提出的立体定位方法是正确的,但要获得好的定位精度,必须有足够的量测精度。

表3 实际SAR量测数据定位精度

Table 3 Positioning accuracy of SAR measuring data

点位	精度	$\Delta S_{xy}$	$\Delta S_z$	$\Delta S$
控制点(8)		20.31	34.72	40.22
检查点(16)		64.01	126.96	142.18

表 3 是用实际 SAR 立体像对上量测的数据计算的结果。由于该地区多为山区,影像中有许多阴影,很难找到便于量测的明显地物点。另外,地面点坐标又是以老图上读取的,致使已知点坐标量测精度大大降低。实验中挑选 8 个已知点作为控制点进行空间后方交会,计算方位参数,其单位权中误差为 $\hat{\sigma}_0 = \pm 2.1$ 像元(左片)和 $\pm 1.3$ 像元(右片),在量测精度范围之内。选取 16 个点作检查,空间后方交会的均方根误差为 $\hat{\sigma} = \pm 4.8$ 像元(左片)和 $\pm 5.2$ 像元(右片)。控制点和检查点上前方交会的定位中误差列于表 3 中。这些数据看似与理论分析模型不相符,但是,理论分析模型是在假定方位参数、地面点坐标、左像点坐标均无误差的前提下得出的,实际上,量测的数据中除了右像点坐标含有误差之外,既包含地面点误差,又包含左像点坐标误差,坐标量测误

差又影响方位参数的计算精度。因此,实际的定位误差是多种误差的综合影响,这些误差有些相互抵消,有些相互累积。因此,只有保证有足够的量测精度,用本文提出的立体定位原理进行 SAR 立体定位才能获得好的定位精度。

## 4 结论与建议

理论分析和实验结果表明,本文提出的 SAR 立体定位原理和方法是正确的;影响定位精度的主要因素是交会角的大小和距离向量测误差;在保证不影响同名点立体量测的前提下,选择具有合适交会角的立体像对,并保证同名点量测精度在子像素范围之内,可望利用 SAR 图像进行中小比例尺测图。

作者受实验资料的限制,对 SAR 图像立体测图潜力的研究还不够深入,建议各单位能做到数据共享,密切合作,共同开展 SAR 测图技术的研究,以充分发挥 SAR 图像在困难地区地图测绘与地图修测中的优越性。

## 参 考 文 献

- 1 P. -H Chen., I. J. Dowman. Space Intersection from ERS-1 Synthetic Aperture Radar Images. *Photogrammetric Record*, 1996, 15(88),561—573.
- 2 时富生. 合成孔径立体雷达图像解析法的研究. *军测科技*, 1989, (2).
- 3 G. Konecny 等. 雷达图像数据的可靠性. 雷达摄影测量译文专辑测绘情报 1992 (增刊).
- 4 张祖勋、周月琴. SPOT 卫星图像外方位元素的解求. *武测科技*, 1988, (2).
- 5 刘勇卫、贺雪鸿译. [日]遥感研究会. 遥感精解. 测绘出版社, 1993 年.

## Stereopair Positioning Algorithm for SAR Images and Its Accuracy Analysis Model

Zhou Yueqin Zheng Zhaobo Li Deren Shu Ning

(Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 430070)

**Abstract** A Stereopair positioning algorithm based on “Equivalent Line Central Projection” is presented for SAR Images in this paper. Then the accuracy potential is analyzed. The theoretical error models and the experimental results show that the main factors affecting the accuracy are radargrammetric configurations and the measured errors in range direction.

**Key words** SAR Images, Image forming equations, Stereopair positioning, Accuracy analysis model