

IECAS 高分辨率机载合成孔径雷达几何精度试验

常本义 高力

(西安测绘研究所 西安 710054)

摘要 本文以实际地形图数据,用经典的雷达摄影测量的方法,检验了中国科学院电子学研究所(IECAS)高分辨率机载合成孔径雷达的几何精度。结果表明:该雷达影像在单图像修测(对已有地图进行更新测量)条件下,平面位置精度优于±4m米;在立体图像量测的条件下,空间位置精度优于±20m。

关键词 合成孔径雷达,图像内方位元素,SAR 图像外方位元素,SAR 单图像定位,SAR 立体图像定位,SAR 正射影像图。

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)05-0945-05

The Geometric Accuracy Test of the Airborne High Resolution SAR Developed by IECAS

Chang Ben-yi Gao Li

(Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xian 710054, China)

Abstract In this paper, geometric accuracy of the airborne high resolution SAR developed by Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences (IECAS) is verified with real terrain map data by using classical radar photogrammetry. The experimental results show that horizontal positional accuracy of single imagery revision is better than ±4m and spatial positional accuracy of stereo images measurement is better than ±20m for the kind of radar imagery.

Key words SAR, Elements of interior orientation of SAR image, Elements of exterior orientation of SAR image, Positioning of single image for SAR, Positioning of stereo images for SAR, Orthorectified radar imagery

1 前言

合成孔径雷达(SAR)由于其全天候、全天时的对地观测能力而广受地学工作者的关注,从上世纪70年代开始,我国就开始了该项技术的探索和研究,中国科学院电子学研究所(以下简称电子所)在70年代末就研制出我国首台机载SAR样机并成功地在云南腾冲进行了对地观测试验。近年来,我国自行研制的机载SAR系统已经达到较高的水平;检验这些SAR系统直接定位的实际能力的任务已经摆在测绘工作者面前。在电子所有关人员的鼎力支持下,我们选择了含有平原、丘陵等地形要素的某地区对电子所新近研制成功的机载SAR图像进行了几何精度试验,现将试验情况报告如下。

2 试验方法

2.1 SAR 图像的投影方程

由距离条件和多普勒条件组成 SAR 图像的投影方程

为^[1](图1)

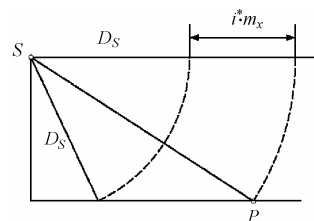


图1 Lebarl 模型示意图

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= (D_s + m_x \cdot i)^2 - [(X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2] = 0 \\ f_2 &= \dot{X}_s(X - X_s) + \dot{Y}_s(Y - Y_s) + \dot{Z}_s(Z - Z_s) = 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

式中 (X_s, Y_s, Z_s) 为雷达站坐标; (X, Y, Z) 为地面点坐标; D_s 为近距边; m_x 为距离向分辨率; i 为雷达距离向坐标; $(\dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s)$ 为雷达站速度分量。

雷达站坐标 (X_s, Y_s, Z_s) 随雷达图像方位向坐标 j 变化而变化,可以用多项式(以3次多项式为例)表示如下:

$$\left. \begin{aligned} X_s &= a_0 + a_1 j + a_2 j^2 + a_3 j^3 \\ Y_s &= b_0 + b_1 j + b_2 j^2 + b_3 j^3 \\ Z_s &= c_0 + c_1 j + c_2 j^2 + c_3 j^3 \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_s &= a_1 + 2a_2j + 3a_3j^2 \\ \dot{Y}_s &= b_1 + 2b_2j + 3b_3j^2 \\ \dot{Z}_s &= c_1 + 2c_2j + 3c_3j^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

设沿飞行方向坐标为 y ，则方位向坐标 j 与 y 坐标有以下关系：

$$y = m_y \cdot j$$

式中 m_y 为方位向分辨率。

以上数学模型完整地表述了 SAR 图像地面点坐标 (X, Y, Z) 与 (i, j) 像坐标的关系。

2.2 SAR 图像外方位元素的定义

SAR 图像外方位元素是由按一定时序排列的雷达站坐标 (X_{sj}, Y_{sj}, Z_{sj}) 求得的描述轨道方程的多项式系数来定义的(见式 2)，即 $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3, c_0, c_1, c_2, c_3$ 。

当然，多项式的项数的选择可以不同，目前用得较多的是二次或三次多项式。

2.3 SAR 图像内方位元素的定义

以摄影测量观点，考察上述 SAR 图像的投影方程，其内方位元素是：近距边 D_s ，方位向分辨率 m_y ，距离向分辨率 m_x ；一般情况下，SAR 图像内方位元素可通过 SAR 外定标场确定。在特殊情况下，也可以把内方位元素作为未知数求解。例如，在已知按一定时序排列的雷达站坐标的条件下，可根据图像上识别的已知点，按式(1)求得雷达系统的内方位元素。

2.4 SAR 单图像定位

单独一幅 SAR 图像，在已知该图像的内、外方位元素及覆盖地区的 DEM(Digital Elevation Model)的条件下，可进行精确的目标定位。其计算方法如下。

2.4.1 已知 SAR 图像像坐标计算地面点坐标(DEM 已知)

(1) 已知 SAR 图像像坐标 i, j ，设定该像点初始高程 Z_0 ，代入式(1)求得 X, Y (该过程中 X, Y 的初值取概略成像区中心坐标)；

(2) 以 X, Y 已知在 DEM 数据区求新的高程 Z ；

(3) 当 $|Z - Z_0| < \Delta$ (允许值)，则该像点地面坐标 (X, Y) 已求得；否则将新求高程取代初始高程返回(1)开始新一轮迭代。

2.4.2 已知地面点坐标 X, Y, Z 求 SAR 图像像坐标 i, j 在已知外方位元素的条件下，该命题的核心是求解该地面点对应的方位向坐标 i, j 。求得后，与该点对应的雷达站坐标同时求得，应用式(1)之距离条件求解距离向坐标 i 就十分容易了。 j 有两种解法：

(1) 已知地面点坐标 (X, Y, Z) 求该点至轨道上 n 个雷达站之间(根据式(2))的距离，其中最短距离雷达站坐标所对应的方位向坐标 j 即为所求。

(2) 根据式(1)之多普勒条件，把式(2)、式(3)代入式(1)的

多普勒条件，结果该式只含 j 一个未知数，解之即可。

2.5 SAR 立体图像定位

如果两幅 SAR 图像具有一定重叠，且形成良好的立体观测条件，当它们的内、外方位元素已知时，则立体重叠区的目标可实现空间定位，其计算方法如下。

2.5.1 已知 SAR 立体图像像坐标计算地面点空间坐标 已知立体图像对像坐标，求地面空间坐标。

(1) 分别根据两方位向坐标，求得两对应的雷达站坐标(见式(2))；

(2) 有了对应的雷达站坐标，根据式(1)可组关于地面点坐标 (X, Y, Z) 的 4 个误差方程式，解该方程即可得到地面点坐标 (X, Y, Z) 。

2.5.2 已知地面点坐标 X, Y, Z 计算 SAR 立体图像像坐标 方法与 2.4.2 完全相同。

2.6 SAR 图像正射影像图的制作

将 SAR 投影的雷达影像变换地图投影的正射影像称为雷达影像的正射纠正。SAR 图像正射影像图制作过程就是雷达影像纠正成雷达正射影像的过程。

2.6.1 SAR 图像正射影像图制作基本步骤 在说明了 SAR 图像定位的方法之后，SAR 正射影像图制作的理论问题已经解决，现仅介绍使用较普遍的间接法，具体步骤如下：(计算条件是：SAR 图像内、外方位元素已知；DEM 已知。)

(1) 根据 SAR 图像覆盖的实际情况确定正射影像图的范围；

(2) 确定起始点地面坐标 (X, Y) 和点的间距 $\Delta X, \Delta Y$ ；

(3) 由地面坐标 (X, Y) ，根据 DEM 求得高程 Z ；

(4) 由地面点三维坐标 (X, Y, Z) ，根据 2.4.2 说明的计算方法求得 SAR 图像像坐标 (i, j) ；

(5) 根据像坐标 (i, j) ，得到 SAR 图像的灰度值；(通常需采用灰度再取样的方法计算新的灰度值)；

(6) 将该灰度值移至地面坐标 (X, Y) 标明的正射位置；然后移至下一点直至整幅图完成。

2.6.2 SAR 图像正射影像图的分块纠正 如果按 2.6.1 节的方法进行逐点纠正则计算量将十分大，在多数情况下也并不是必需的。为了减少计算量，人们提出了分块纠正的方法，即把正射影像图规则地分为许多小方块，严格的正射纠正只在方块的四角点上进行。在记录下方块四角点雷达像坐标后，在 SAR 图像上把对应的小块影像用仿射变换的方法整体地移至正射影像上，此即为 SAR 图像正射影像图的分块纠正。

3 试验结果

3.1 SAR 图像内、外方位元素计算试验

3.1.1 原始 SAR 图像立体图像对(如图 2) SAR 图像立体图像对的重叠部分如图所示，其飞行高度约 5000m，侧视角 60° ，两航线相距约 3000m。

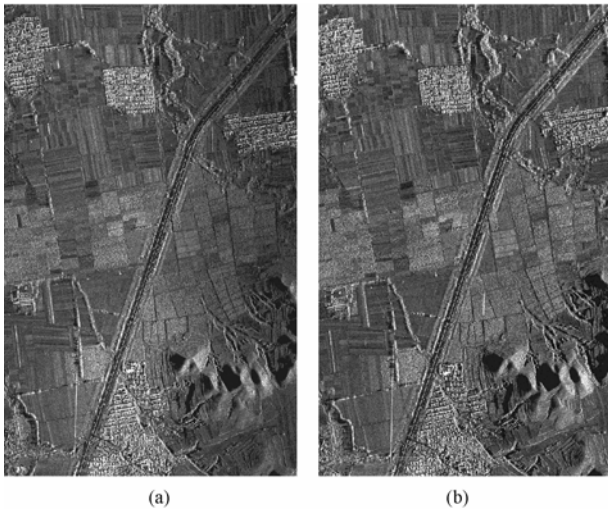


图 2 原始雷达影像 (a)左图像 (b)右图像

3.1.2 试验地区的地形图和数字高程模型 DEM(如图 3、图 4)



图 3 实验地区的地形图

3.1.3 外方位元素计算 外方位元素的计算: 表 1(a)的结果使用左片 28 个控制点数据

表 1(b)的结果使用右片数据 29 个控制点数据:

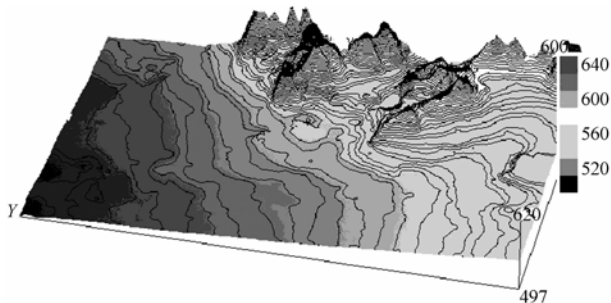


图 4 试验地区 DEM

3.1.4 内方位元素计算 当外方位元素和少量地面控制点已知的条件下, 可以计算出近距离边长 D_s 、距离向分辨率 m_y 、距离向分辨率 m_x 。实验计算结果列入表 2。

3.2 单图像定位精度

在已知 DEM 范围内, 选择 20 个点分别进行单图像定

位试验, 结果列入表 3。

3.3 立体图像定位精度

在立体重叠区域选择 17 个点作立体定位试验, 结果列入表 4。

3.4 正射影像图几何精度

由左雷达影像制作的正射影像图如图 5 所示。

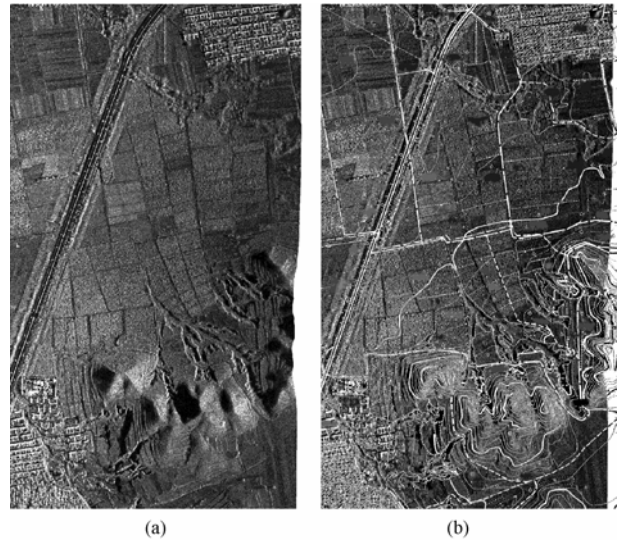


图 5 正射影像图

雷达正射影像图与数字地形图的叠加如图 6 所示。

从数字地形图和雷达正射影像图叠加检查证明: 定位精度高, 效果很好, 特别是山区等高线部分十分吻合。



图 6 地形图和雷达正射影像图的叠加

从正射雷达影像与对应的可见光正射影像上选择 28 个检查点, 比较像坐标得到表 5 的结果。

4 结论与建议

4.1 初步结论

(1) 电子所新近研制的高分辨率机载 SAR 单图像定位与正射影像图位置精度优于 $\pm 4m$, 满足 1: 1 万地形图修测精度要求。

(2) 该雷达立体图像空间定位精度优于 $\pm 20m$, 由于高程

表 1 (a) 使用二次空间参数方程 9 个定向参数(左片)

$a_0 = 4.7646566603e+005$	$a_1 = 2.0229539229e-003$	$a_2 = -3.4966036041e-007$
$b_0 = 3.6282669353e+005$	$b_1 = -9.7942729096e-001$	$b_2 = -5.5445991644e-008$
$c_0 = 5.0108828395e+003$	$c_1 = -7.8082906082e-003$	$c_3 = -2.3947867641e-006$

x 中误差 1.698002 像素, y 中误差 1.607936 像素

表 1 (b) 使用二次空间参数方程 9 个定向参数(右片)

$a_0 = 4.7859972106e+005$	$a_1 = -3.8762862490e-002$	$a_2 = 2.1042511470e-007$
$b_0 = 3.6345687327e+005$	$b_1 = -9.5363963327e-001$	$b_2 = 6.4276982962e-007$
$c_0 = 4.5972404301e+003$	$c_1 = -6.7649042702e-002$	$c_3 = 4.3119564756e-006$

x 中误差为 1.632452 像素, y 中误差 1.397824 像素

表 2 计算所得的部分定向元素与已知值比较(单位: m)

	D_s	m_y	m_x
已知值	10250.0	1.2	1.25
计算所得值	10249.972010	1.2000199577	1.2551651177
与已知值的差	0.02799	0.0000199577	0.0051651177

表 3 单片定位结果(单位: m)

点号	X 方向误差	Y 方向误差	Z 值和 DEM 内插值之差
1003	-1.177	0.020	0.700
1005	0.983	0.962	-0.300
1006	6.123	0.948	-0.500
1007	-0.822	-1.207	0.300
1010	-0.971	2.858	-1.000
1011	-0.480	2.424	-1.000
1014	-0.020	-1.041	0.800
1029	-4.416	0.333	-0.100
1049	-3.686	-2.121	-1.300
2003	1.719	-2.395	-0.100
2004	-0.708	-1.866	-0.500
2006	0.337	-0.683	-0.200
2009	1.448	-0.346	-0.200
1042	2.131	3.289	-2.300
1044	2.073	4.291	-1.500
1055	0.183	-1.966	0.600
1052	1.090	-2.247	1.000
1053	0.947	-4.075	1.000
1054	1.277	2.719	1.000
1056	-2.401	-4.473	3.800

X 方向中误差 3.11m, Y 方向中误差 2.4m, Z 与 DEM 值的差的中误差 1.76m

表 4 改正右片近距离边长后的前方交会计算结果(单位: m)

ID	X 误差	Y 误差	Z 误差
1003	-1.26173228	-0.67315075	2.14613397
1005	3.73695943	0.71387535	-6.73483789
1007	-2.58415817	-2.16918378	6.00249509
1010	1.05692089	1.56254429	-4.17898711
1011	2.71176279	1.37917195	-6.36975239
1014	3.80603624	-1.70078975	-7.49934509
1029	9.41348449	-2.29613368	-29.22146139
2003	-7.64896973	-0.83107269	20.71681279
2004	-1.45965423	-1.40160262	0.52948373
2006	-0.25722993	0.28355690	1.18734107
2008	-1.03292617	2.77004921	4.30672440
2009	8.98731845	-0.95855914	-18.67769831
2026	1.05707304	1.66830058	0.78173859
1040	13.87941649	-1.31556501	-36.01264275
1042	-8.08512393	-1.03787001	15.33160424
1044	-0.80506306	2.94168852	4.99934465
1055	-1.91941266	-1.92921411	5.62769166

X 方向中误差 5.63499820m, Y 方向中误差 1.67104721m, Z 与 DEM 值的差的中误差 14.22857584m.

表 5 正射雷达影像与对应的可见光
正射影像的比较统计(单位: m)

检查点 ID	图像 x	图像 y	检查点 ID	图像 x	图像 y
1	-2.780	-0.342	17	0.957	0.325
2	0.927	0.463	18	0.132	0.676
3	-1.291	-2.157	20	-4.170	1.292
4	-1.792	-0.987	21	3.243	4.634
6	2.879	-3.030	22	-2.720	-4.278
7	1.891	-2.666	23	4.223	-2.314
8	0.070	-1.792	24	3.244	0.000
9	-0.209	-3.952	25	3.751	0.331
10	-2.956	0.943	26	2.552	-0.136
11	-5.601	0.352	27	2.871	-1.576
12	3.790	-1.199	28	0.927	1.390
13	2.890	-1.008	29	4.545	3.243
15	0.660	-1.390	30	-3.130	-0.871
16	3.243	2.780	31	2.237	3.863

图像 x 方向中误差 2.847m, y 方向中误差 2.165m

精度较低, 只能用于困难地区中、小比例尺地形图测图与修测的要求。SAR 立体图像空间定位精度差的原因主要是: 该雷达侧视角仍然偏大, 造成立体图像同名点(地物目标在立体影像上所成的两个像点)之交会角(同名点对应的地面点分别与左右摄站点连线的夹角)仅达到 1° 到 3° , 导致高程精度显著下降。

4.2 建议

(1)机载测量型 SAR 的实时定位 GPS 系统应改为实时相

位差分 DGPS 系统, 在事后处理条件下, 实时定位精度将优于米级水平。这将显著提高系统的精度水平和经济、社会效益。

(2)在完成以上改造时, 遥感平台要严格测定 GPS 天线和 SAR 天线在遥感平台参考框架内的位置偏离量, 以便于用户把 GPS 天线空间位置转换为 SAR 天线的位置。

(3)机载测量型 SAR 系统要尽可能严格测定近距边、方位向分辨率和距离向分辨率 3 个参数, 若这 3 个参数随图像获取的时间而变化, 则应给出随时间变化的模型。

致谢 长期以来电子所从事合成孔径雷达研制、成像处理和应用研究的同志们一直给予我们宝贵的支持, 上世纪 90 年代西安测绘研究所的 SAR 图像的地图修测应用研究, 其数据就是来自电子所; 2003 年杨汝良研究员、雷宏研究员等提供的 2m 分辨率机载 SAR 图像数据为测绘应用定性研究发挥了重要作用; 2004 年电子所米级高分辨率机载合成孔径雷达研制成功, 王岩飞研究员、张冰尘副研究员等为支持我们的定量的几何精度试验提供了高质量的机载 SAR 图像数据, 为合成孔径雷达测绘应用研究给予了有力的支持, 在此我们深表谢意。

参考文献

- [1] Leberl F, Domik G, Kobrick M. Mapping with aircraft and satellite radar images. *Photogrammetric Record*, 1985, 11(66): 647 - 665.
- [2] 常本义, 高力. SAR 单图像定位原理[J]. 解放军测绘研究所学报, 2001, 21(4): 1 - 5.
- [3] 常本义, 高力. SAR 摄影测量应用系统的几何算法和试验[J]. 测绘科学与工程, 2004, 24(1): 5 - 8.

常本义: 男, 1922 年生, 研究员, 近年来主要从事合成孔径雷达测绘应用研究, 已发表该专业方向论文 5 篇。

高力: 男, 1976 年生, 助理工程师。