利用单个地面控制点的 SAR 图像高精度立体定位

张红敏*①　　靳国旺①②　　徐　青①　　李向英③
①(信息工程大学　郑州　450001)
②(中国测绘科学研究院　北京　100039)
③(61512 部队　北京　100088)

摘　要：几何构像模型和定向参数解算方案的选择是实现 SAR 图像高精度立体定位的关键。该文针对稀少控制下斜侧视 SAR 图像高精度定位难题，设计了利用单个地面控制点的 SAR 图像立体定位方案。该方案利用轨道参数获取成像瞬间天线相位中心的位置、速度，并利用一个地面控制点标定近距延迟和多普勒中心频率，实现定向参数的精确解算和 SAR 图像的高精度立体定位。采用中国测绘科学研究院获取的机载 SAR 图像进行了立体定位实验，统计分析了其定位误差，验证了该文方法的精确性和有效性。

关键词：合成孔径雷达(SAR)；立体；定位；距离-多普勒；地面控制点(GCP)
中图分类号：TP75; P237　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2095-283X(2014)01-0085-07
DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13138

Accurate Positioning with Stereo SAR Images and One Ground Control Point

Zhang Hong-min①　　Jin Guo-wang①②　　Xu Qing①　　Li Xiang-ying③
①(*Information Engineering University*, *Zhengzhou* 450001, *China*)
②(*Chinese Academy of Surveying and Mapping*, *Beijing* 100039, *China*)
③(61512 *Troops*, *Beijing* 100088, *China*)

Abstract: Geometrical imaging models and calculations of orientation parameters are the main factors affecting the positioning of stereo Synthetic Aperture Radar (SAR) images. For accurate positioning with squint stereo SAR images and less Ground Control Points (GCPs), a positioning algorithm with one GCP is designed. In this algorithm, the position and velocity of the radar antenna phase center are derived using orbit parameters, and the close range and Doppler centroid of the SAR images are compensated by one GCP. Thus, accurate orientation parameters are obtained and accurate positioning with stereo SAR images is completed. Airborne SAR images acquired by the Chinese Academy of Surveying and Mapping are used in experiments. The positioning errors of the checkpoints are calculated and analyzed, and it verified the accuracy and effectiveness of the proposed method.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Stereo; Positioning; Range-Doppler; Ground Control Point (GCP)

1　引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天时、全天候等优点，是高分辨率对地观测的重要工具，尤其在多云雾、多雨雪地区地形测绘、应急测绘保障、境外目标定位等任务中存在巨大应用潜力[1−3]。利用 SAR 图像进行立体定位是测定地面目标位置信息的重要手段。

在 SAR 图像立体定位中，几何构像模型和定向参数解算方法的选择是实现高精度定位的关键。在几何构像模型选择方面，经典 SAR 构像模型包括距离-多普勒(R-D)模型[4]，F. Leberl 构像模型[5](即正侧视 R-D 模型)，G. Konecny 投影公式[6]，有理函数模型等；除上述模型外，学者们研究了 SAR 图像的有理多项式(Rational Polynomial Coefficient, RPC)模型[7]、距离-共面(Range-Coplanarity)模型[8]等。其中，R-D 模型作为符合 SAR 图像成像机理的经典构像模型，应用较多，但已有研究大多将 R-D 模型的多普勒中心频率假定为零，即采用正侧视 R-D 模型进行 SAR 图像的定位处理[9−12]，在进行斜侧视 SAR 图像的立体定位时误差较大[13]。

2013-12-23 收到，2014-03-17 改回；2014-03-24 网络优先出版
国家自然科学基金(40771142, 40871213, 41071296)和中国测绘科学研究院基本科研业务费项目资助课题
*通信作者：　张红敏　zhmin1206@163.com

定向参数解算通常依赖一定数量的地面控制点，缺少地面控制点情况下，定向参数一般由SAR系统参数和轨道参数获取[14]，然而由于上述参数误差的存在，常导致无控制定位精度较差[15]。为了实现稀少控制的立体SAR图像高精度定位，本文设计了利用单个地面控制点(Ground Control Point, GCP)的SAR图像斜侧视立体定位方案，利用轨道参数获取成像瞬间天线相位中心的位置、速度，并利用1个地面控制点精确标定近距延迟和多普勒中心频率，实现斜侧视SAR图像的高精度立体定位。采用中国测绘科学研究院获取的机载SAR图像进行了立体定位实验，验证了该方案的精确性和有效性。

2 利用单个控制点的SAR图像斜侧视高精度立体定位

为了提高稀少控制下SAR图像立体定位精度，本文设计了如图1所示的SAR图像高精度立体定位方案，在由轨道参数获取各天线相位中心位置、速度的基础上，利用1个地面控制点标定各图像的近距延迟和多普勒中心频率，从而由同名像点坐标精确交会计算出相应地面点的3维坐标。其关键步骤包括：

(1) 利用单个控制点的斜侧视R-D模型定向参数标定

根据轨道参数提供的一定数量的天线相位中心位置(X_S,Y_S,Z_S)，速度(V_X,V_Y,V_Z)和相应时刻t，可采用多项式拟合天线相位中心的运行轨迹，从而得到任意像点对应的天线相位中心的位置和速度。

在由轨道参数获取天线相位中心位置、速度的基础上，根据R-D模型，可由1个或1个以上的地面控制点标定近距延迟和多普勒中心频率。其中，R-D模型的表达式为：

$$\left.\begin{aligned}&(X-X_S)^2+(Y-Y_S)^2+(Z-Z_S)^2=(R_0+M_{\text{slant}}\cdot y)^2\\&V_X(X-X_S)+V_Y(Y-Y_S)+V_Z(Z-Z_S)=-\frac{\lambda R_s}{2}f_{\text{dc}}\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中，(X,Y,Z)为地面点P的坐标，(x,y)为P点相应像点坐标，(X_S,Y_S,Z_S)和(V_X,V_Y,V_Z)分别为成像瞬间天线相位中心S的瞬时位置和瞬时速度，它们是关于方位向像坐标x的函数，M_{slant}为SAR图像距离向采样间隔，R_0为近距延迟，R_s为地面点P到天线相位中心S的斜距，λ为雷达波长，f_{dc}为多普勒中心频率。

R-D模型根据成像时的距离条件和多普勒频移条件建立SAR成像瞬间相对严格的物像关系，符合SAR成像机理。考虑到R-D模型是关于近距延迟R_0和多普勒中心频率f_{dc}的非线性方程，本文采用线性化牛顿迭代答解的方法。

(2) 地面点3维坐标计算

获得定向参数后，根据斜侧视R-D模型，建立同名像点$p_1(x^{\text{L}},y^{\text{L}})$，$p_2(x^{\text{R}},y^{\text{R}})$与相应地面点$P(X,Y,Z)$关系的方程组：

$$\left.\begin{aligned}&\left(X-X_S^{\text{L}}\right)^2+\left(Y-Y_S^{\text{L}}\right)^2+\left(Z-Z_S^{\text{L}}\right)^2=\left(R_0^{\text{L}}+M_{\text{slant}}\cdot y^{\text{L}}\right)^2\\&V_X^{\text{L}}\left(X-X_S^{\text{L}}\right)+V_Y^{\text{L}}\left(Y-Y_S^{\text{L}}\right)+V_Z^{\text{L}}\left(Z-Z_S^{\text{L}}\right)=-\frac{\lambda f_{\text{dc}}^{\text{L}}}{2}R_s^{\text{L}}\\&\left(X-X_S^{\text{R}}\right)^2+\left(Y-Y_S^{\text{R}}\right)^2+\left(Z-Z_S^{\text{R}}\right)^2=\left(R_0^{\text{R}}+M_{\text{slant}}\cdot y^{\text{R}}\right)^2\\&V_X^{\text{R}}\left(X-X_S^{\text{R}}\right)+V_Y^{\text{R}}\left(Y-Y_S^{\text{R}}\right)+V_Z^{\text{R}}\left(Z-Z_S^{\text{R}}\right)=-\frac{\lambda f_{\text{dc}}^{\text{R}}}{2}R_s^{\text{R}}\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式中，$\left(X_S^{\text{L}},Y_S^{\text{L}},Z_S^{\text{L}}\right)$和$\left(X_S^{\text{R}},Y_S^{\text{R}},Z_S^{\text{R}}\right)$，$\left(V_X^{\text{L}},V_Y^{\text{L}},V_Z^{\text{L}}\right)$和$(V_X^{\text{R}},V_Y^{\text{R}},V_Z^{\text{R}})$分别为左、右天线相位中心的位置和速度，$R_0^{\text{L}}$和$R_0^{\text{R}}$，$f_{\text{dc}}^{\text{L}}$和$f_{\text{dc}}^{\text{R}}$分别为左、右图像的近距延迟和多普勒中心频率，$R_s^{\text{L}}$和$R_s^{\text{R}}$分别为同名像点$p_1$和$p_2$对应的斜距。

由于式(2)是关于地面点3维坐标的非线性方程组，解算时采用线性化迭代答解方法。从而计算得到地面点3维坐标，完成相应同名像点的斜侧视立体定位。

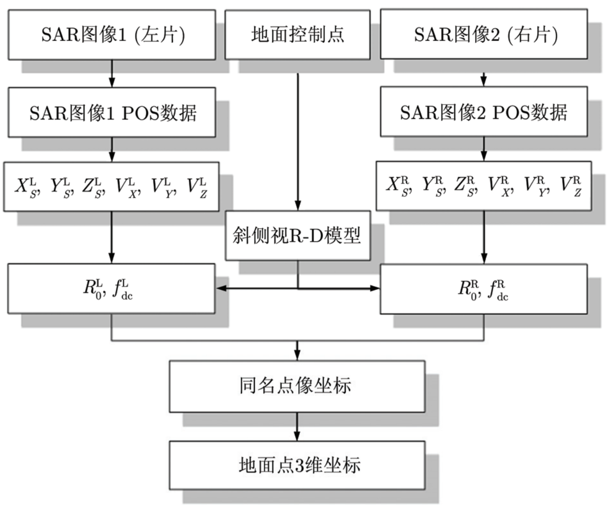


图1 利用单个地面控制点的SAR图像斜侧视高精度立体定位流程

Fig. 1 Flow of accurate squint positioning of stereo SAR images with one GCP

3 SAR图像立体定位实验

采用中国测绘科学研究院获取的两个SAR立体像对进行了稀少控制下的SAR图像立体定位实验，SAR系统采用X波段，中心侧视角为48°，SAR立体像对的相关参数如表1所示。

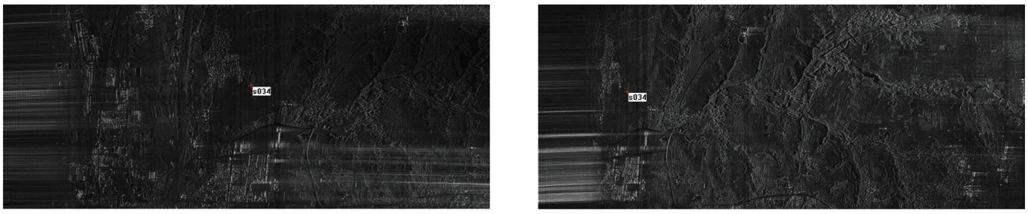
表 1　立体 SAR 像对相关参数

Tab. 1　Parameters of stereo SAR images

参数类型	立体像对 1		立体像对 2	
	左片	右片	左片	右片
天线高度(m)	3157.441	3160.968	3156.930	3159.477
航速(m/s)	122.853	130.592	124.348	132.360
中心经度(°)	113.084	113.084	113.051	113.051
中心纬度(°)	34.368	34.389	34.368	34.388
方位向采样间隔(m)	0.314	0.334	0.318	0.339
距离向采样间隔(m)	0.250	0.250	0.250	0.250

SAR 立体像对 1 的控制点分布如图 2 所示，检查点分布如图 3 所示；SAR 立体像对 2 的控制点分布如图 4 所示，检查点分布如图 5 所示；SAR 立体像对 1，像对 2 的控制点和检查点坐标分别如表 2 和表 3 所示；为了控制数据的保密，将绝对坐标中的低位数值保留，高位数值以“***”代替。

现有的 SAR 图像立体定位方法多利用多个控制点标定全部定向参数，为了充分验证本文方法的优势，对比实验中分别采用正侧视 R-D 模型和斜侧视 R-D 模型；采用正侧视 R-D 模型时利用 3 个或 3 个以上地面控制点标定天线相位中心 3 个位置分量和 3 个速度分量共 6 个定向参数，进而完成 SAR 图像的正侧视立体定位；采用斜侧视 R-D 模型时，由于近距延迟与天线相位中心位置、速度等参数相关，因此在对比实验中利用 4 个或 4 个以上地面控制点标定天线相位中心位置分量、速度分量和多普勒中心频率，共 7 个定向参数，进而实现 SAR 图像的斜侧视立体定位。

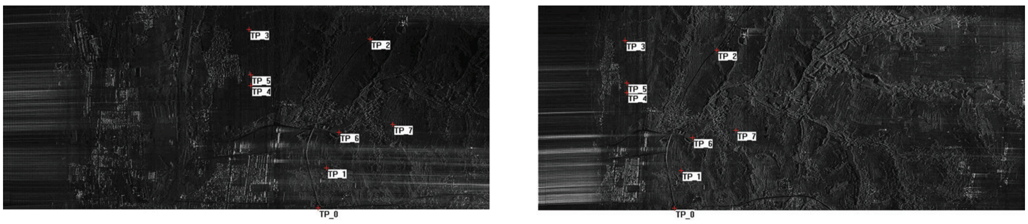


(a) 左片
(a) The left image

(b) 右片
(b) The right image

图 2 SAR 立体像对 1 控制点分布

Fig. 2　GCP in stereo SAR images 1

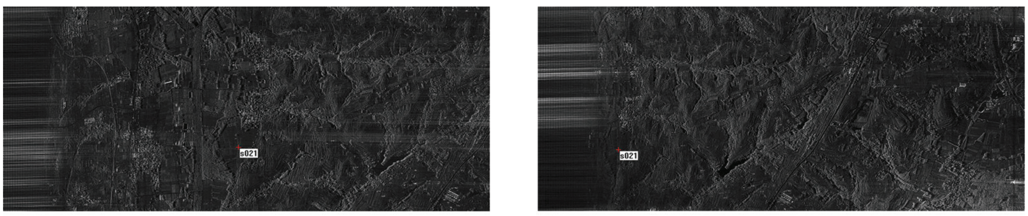


(a) 左片
(a) The left image

(b) 右片
(b) The right image

图 3 SAR 立体像对 1 检查点分布

Fig. 3　Check points in stereo SAR images 1

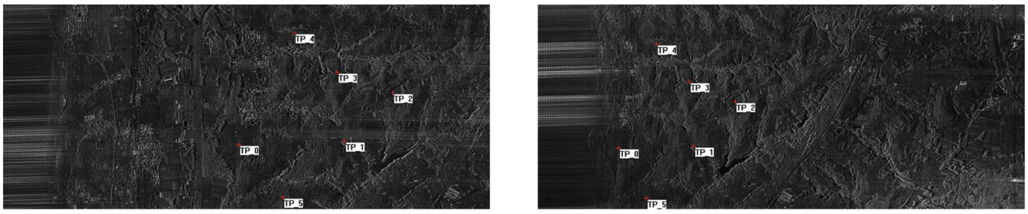


(a) 左片
(a) The left image

(b) 右片
(b) The right image

图 4 SAR 立体像对 2 控制点分布

Fig. 4　GCP in stereo SAR images 2



(a) 左片
(a) The left image

(b) 右片
(b) The right image

图 5 SAR 立体像对 2 检查点分布

Fig.5 Check points in stereo SAR images 2

表 2 立体 SAR 像对 1 控制点和检查点坐标

Tab. 2 Coordinates of GCP and check points in stereo SAR images 1

类型	点号	左片像点坐标(像元)		右片像点坐标(像元)		高斯坐标(m)		
		x	y	x	y	X	Y	Z
控制点	s034	9915.57	4979.93	3539.48	4717.48	***361.89	***116.12	247.68
检查点	TP_0	12593.80	74.09	5423.67	89.49	***198.44	***675.06	278.40
	TP_1	12945.40	1679.78	5709.36	1599.09	***290.61	***170.76	274.47
	TP_2	14676.96	6819.01	7117.99	6416.03	***770.97	***565.57	291.75
	TP_3	9837.71	7198.02	3467.06	6803.57	***337.12	***417.79	259.83
	TP_4	9915.57	4979.93	3539.48	4717.48	***361.89	***116.12	247.68
	TP_5	9910.95	5395.31	3530.75	5109.05	***361.24	***984.60	249.75
	TP_6	13438.81	3090.93	6148.92	2924.74	***407.17	***731.01	241.83
	TP_7	15574.55	3418.93	7892.31	3219.36	***029.04	***641.40	276.75

表 3 SAR 立体像对 2 控制点和检查点坐标

Tab. 3 Coordinates of GCP and check points in stereo SAR images 2

类型	点号	左片像点坐标(像元)		右片像点坐标(像元)		高斯坐标(m)		
		x	y	x	y	X	Y	Z
控制点	s034	9915.57	4979.93	3539.48	4717.48	***361.89	***116.12	247.68
检查点	TP_0	9421.78	2603.92	3225.61	2483.69	***168.52	***747.70	245.91
	TP_1	13639.10	2743.79	6220.16	2545.14	***460.49	***724.80	320.07
	TP_2	15552.61	4652.52	7864.42	4320.26	***987.91	***128.63	319.59
	TP_3	13340.12	5496.31	6044.64	5135.14	***345.51	***849.13	291.21
	TP_4	11635.40	7045.10	4726.93	6615.09	***844.59	***348.29	291.87
	TP_5	11185.16	479.83	4322.59	449.72	***744.67	***432.12	290.79

采用上述多个控制点的正侧视立体定位方法、多个控制点的斜侧视立体定位方法和本文提出的单个控制点的斜侧视立体定位方法分别对立体像对 1 和立体像对 2 进行了斜侧视立体定位，误差统计分别如表 4 和表 5 所示；采用本文方法的平面定位精度和高程定位精度如表 6 所示；标定前后的近距延迟和多普勒中心频率如表 7 所示。

由表 4 和表 5 可知，对于 SAR 立体像对 1 和 SAR 立体像对 2，采用多个控制点的正侧视立体定位方法，检查点坐标误差最大；采用多个控制点的斜侧视立体定位方法，检查点坐标误差居中；采用本文提出的单个地面控制点的斜侧视立体定位方法，检查点坐标误差最小，约为 1 m。并且由表 6 可知，采用本文方法，两个立体像对的平面定位精度和高程定位精度均为 1 m 量级。分析其原因在于：

表 4 SAR 立体像对 1 斜侧视定位误差统计(m)

Tab. 4　Squint positioning errors of stereo SAR images 1 (m)

检查点	多控制点的正侧视定位			多控制点的斜侧视定位			单个控制点的斜侧视定位		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
TP_0	−32.644	−1.627	−48.427	−26.262	−1.191	−40.747	−0.559	−3.079	−1.044
TP_1	−17.847	0.472	−27.664	−17.580	0.228	−27.465	−0.743	−1.371	−1.329
TP_2	30.940	5.545	41.423	9.238	2.105	17.931	−1.268	1.035	−0.878
TP_3	15.220	1.592	23.949	−4.217	−0.037	−2.749	−0.335	0.182	−0.573
TP_4	−4.675	−1.037	−5.022	−16.526	−0.602	−20.129	−0.764	−0.436	−1.328
TP_5	−1.173	0.146	1.585	−14.418	0.133	−15.660	−0.972	0.285	−0.063
TP_6	−4.424	−1.624	−9.606	−9.790	−0.864	−15.987	−0.351	−1.645	−1.539
TP_7	7.125	0.542	9.200	0.295	0.129	0.501	0.436	−1.230	1.099
中误差	18.258	2.241	26.468	14.486	0.938	21.360	0.744	1.456	1.078

表 5 SAR 立体像对 2 斜侧视定位误差统计(m)

Tab. 5　Squint positioning errors of stereo SAR images 2 (m)

检查点	多控制点的正侧视定位			多控制点的斜侧视定位			单个控制点的斜侧视定位		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
TP_0	−31.286	−5.539	−41.264	−0.581	0.349	−0.331	2.241	0.981	0.981
TP_1	−8.662	2.924	−12.578	12.487	−0.638	22.130	0.016	1.354	0.333
TP_2	14.510	2.738	19.150	11.026	−0.391	22.107	−0.430	0.794	−0.770
TP_3	15.373	2.659	19.586	6.181	−0.278	14.125	−0.250	0.390	0.046
TP_4	23.524	2.646	30.844	−0.240	−1.190	4.011	−1.027	−1.188	−1.378
TP_5	−42.686	−1.477	−58.537	8.299	−0.667	13.277	0.300	1.669	0.349
中误差	25.417	3.240	34.130	8.010	0.661	15.113	1.034	1.138	0.784

表 6 利用单个地面控制点的 SAR 立体定位平面及高程精度统计(m)

Tab. 6　Plane precision and elevation precision of positioning with stereo SAR images and one GCP (m)

类别	立体像对1定位精度	立体像对2定位精度
平面精度	1.156	1.087
高程精度	1.078	0.784

表 7 标定前后的近距延迟和多普勒中心频率

Tab. 7　The close range and the Doppler centroid before and after compensation

参数类别	立体像对 1		立体像对 2	
	左片	右片	左片	右片
标定前的近距延迟(m)	2690.637	2690.637	2690.637	2690.637
标定后的近距延迟(m)	2563.402	2563.005	2562.859	2563.088
标定前的多普勒中心频率(Hz)	−322.720	−381.867	−320.851	−411.772
标定后的多普勒中心频率(Hz)	−321.374	−379.771	−318.162	−409.666

(1) 采用正侧视 R-D 模型不符合机载斜侧视 SAR 图像构像机理，因此利用其进行立体定位，定位误差较大；为了提高斜侧视 SAR 图像定位精度，应采用斜侧视 R-D 模型；

(2) 由于近距延迟与天线相位中心位置、速度等参数相关，现有的斜侧视立体定位方法难以利用控制点同时标定全部定向参数，因此近距延迟通常采用系统参数提供，然而该系统参数存在一定误差，导致现有斜侧视定位方法误差较大；

(3) 本文方法利用了精度较高的 POS 数据获取天线相位中心位置、速度等参数，利用 1 个地面控制点标定近距迟延和多普勒中心频率，较好地修正了上述参数的误差(如表 7 所示)，因此可实现高精度的 SAR 图像立体定位；

(4) 本文方法充分利用了轨道参数等已有信息，只需一个地面控制点即可实现 1 m 量级的立体定位，较好地降低了对地面控制点数量和分布的要求。

为了充分验证本文结果的正确性与可靠性，分别计算了上述两组数据各检查点对应的系数矩阵条件数，分别如表 8 和表 9 所示。

表 8 立体像对 1 各检查点的矩阵条件数
Tab. 8 Matrix condition number of each check point in stereo SAR images 1

检查点	系数矩阵条件数
TP_0	76.582
TP_1	77.874
TP_2	84.246
TP_3	66.763
TP_4	67.058
TP_5	67.050
TP_6	79.731
TP_7	87.591

表 9 立体像对 2 各检查点的矩阵条件数
Tab. 9 Matrix condition number of each check point in stereo SAR images 2

检查点	系数矩阵条件数
TP_0	64.508
TP_1	79.351
TP_2	86.404
TP_3	78.370
TP_4	72.270
TP_5	70.534

根据式(2)可知，对于每个检查点而言，其地面 3 维坐标的求解都是由相应同名像点坐标列出的 4 个方程来构成方程组。各检查点对应方程组的条件数与相应同名像点的坐标、视差、基高比(基线长度与相对高程值之比)等因素有关。

从表 8 和表 9 可以看出，两个立体像对中所有检查点的条件数均较小，对应的系数矩阵均满秩，各个方程组均无病态问题，保证了本文结果的正确性与可靠性，进而验证了本文方法对交会条件较好的 SAR 数据的有效性。在 SAR 图像的立体定位中，需要注意的是：

(1) 为了获得良好的立体定位结果，应尽量选取立体交会条件较好的两轨 SAR 图像；

(2) 若两次观测的轨迹、视角等近似一致，则难以通过立体测量方式得到可靠的定位结果。

4 总结

选择几何构像模型和定向参数解算方案是实现 SAR 图像高精度立体定位的关键。针对稀少控制下斜侧视 SAR 图像高精度立体定位难题，设计了利用单个地面控制点的 SAR 图像斜侧视高精度立体定位方案。该方案利用轨道参数获取天线相位中心的位置和速度信息，利用 1 个地面控制点标定 SAR 图像的近距延迟和多普勒中心频率，在此基础上由立体像对中的同名像点坐标求解相应地面点的 3 维坐标。采用中国测绘科学研究院获取的机载 SAR 图像进行了立体定位实验，统计分析了定位误差，验证了本文方案的精确性和有效性。

实验中所采用的 SAR 图像覆盖区域地形起伏较小，后续将进一步研究本文方法在高程起伏较大地区的适用性；为了进一步促进 SAR 图像立体定位技术的发展和应用，下一步将研究斜侧视 SAR 图像区域网空中三角测量技术，以实现大区域稀少控制的 SAR 图像控制点加密与高精度定位。

参 考 文 献

[1] 张红敏. SAR 图像高精度定位技术研究[D]. [博士论文], 信息工程大学, 2013: 1–2.
Zhang Hong-min. Research on technologies of accurate positioning with SAR images[D]. [Ph.D. dissertation], Informational Engineering University, 2013: 1–2.

[2] 靳国旺. InSAR 获取高精度 DEM 关键处理技术研究[D]. [博士论文], 信息工程大学, 2007: 1–3.
Jin Guo-wang. Research on key processing techniques for accurate DEM deriving from InSAR[D]. [Ph.D. dissertation], Information Engineering University, 2007: 1–3.

[3] 靳国旺. InSAR 地形测绘若干问题研究[R]. 中国科学院电子

学研究所博士后出站报告, 2011: 1.
Jin Guo-wang. Research on key technologies of InSAR topographic surveying and mapping[R]. Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences Postdoctoral Report, 2011: 1.

[4] Brown W M. Synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1967, AES-3(2): 217–229.

[5] Leberl F W. Radargrammetry for image interpretation[R]. ITC Technical Report, 1978: 1–228.

[6] Konecny G, Schuhr W, and Howington-Kraus A. Mapping accuracy using side-looking radar images on the analytical stereoplotter[C]. 15th International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Conference, Kyoto, 1988: 474–480.

[7] 张过, 费文波, 李贞, 等. 用 RPC 替代星载 SAR 严密成像几何模型的试验与分析[J]. 测绘学报, 2010, 39(3): 264–270.
Zhang Guo, Fei Wen-bo, Li Zhen, *et al.*. Analysis and test of the subsitutability of the RPC model for the rigorous sensor model of spaceborne SAR imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(3): 264–270.

[8] 程春泉, 张继贤, 邓喀中, 等. 雷达影像几何构像距离-共面模型[J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 38–49.
Cheng Chun-quan, Zhang Ji-xian, Deng Ka-zhong, *et al.*. Range-coplanarity equation for radar geometric imaging[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(1): 38–49.

[9] Curlander J C. Location of pixels in space borne SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1982, 20(3): 359–364.

[10] 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.
Yang Jie, Pan Bin, Li De-ren, *et al.*. Location of spaceborne SAR imagery without reference points[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(2): 144–147.

[11] 陈尔学, 李增元, 卢颖, 等. 三颗高分辨率星载SAR的定位模型构建及其定位精度评价[J]. 遥感信息, 2010, 2: 43–48.
Chen Er-xue, Li Zeng-yuan, Lu Ying, *et al.*. Constructiong geo-location models and their geo-location accuracy evaluation of three high resolution satellite SAR [J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 2: 43–48.

[12] Leberl F W. Radargrammetric Image Processing[M]. Massachusetts: Artech House, 1990.

[13] 袁修孝, 吴颖丹. 缺少控制点的星载 SAR 遥感影像对地目标定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(1): 88–91.
Yuan Xiu-xiao and Wu Ying-dan. Object location of space-borne SAR imagery under lacking ground control points[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(1): 88–91.

[14] 张兢, 杨杰, 郎丰铠, 等. 提高无控制点星载SAR影像的定位精度研究[J]. 测绘信息与工程, 2011, 36(5): 17–19.
Zhang Jing, Yang Jie, Lang Feng-kai, *et al.*. Improving location accuracy of space-borne SAR imagery with out reference points[J]. *Journal of Geomatics*, 2011, 36(5): 17–19.

[15] 张红敏, 靳国旺, 徐青. 基于DEM和图像仿真的单幅SAR图像无控制定位[J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(3): 274–278.
Zhang Hong-min, Jin Guo-wang, and Xu Qing. Positioning with single SAR image based on DEM without ground control point[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2013, 30(3): 274–278.

[16] 李银伟, 韦立登, 向茂生. 机载干涉 SAR 运动补偿中地物目标定位误差的影响分析[J]. 雷达学报, 2013, 2(4): 492–498.
Li Yin-wei, Wei Li-deng, and Xiang Mao-sheng. Effects of target positioning error on motion compensation for airborne interferometric SAR[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(4): 492–498.

作 者 简 介

张红敏(1984–)，女，河北大城人，博士，讲师，主要从事 SAR 图像高精度定位技术研究，发表论文 10 余篇，获得国家技术发明专利 3 项。
E-mail: zhmin1206@163.com

靳国旺(1977–)，男，河北滦南人，博士，副教授，主要从事摄影测量与遥感、InSAR 技术研究。

徐　青(1964–)，男，浙江磐安人，博士，教授，主要从事摄影测量与遥感、空间仿真技术研究。

李向英(1977–)，男，吉林长春，硕士，工程师，主要从事摄影测量技术研究。