

基于自校验直接线性变换的星载 SAR 图像定位方法研究*

李立钢^{1,2,3,4}, 尤红建², 刘波^{1,4}, 吴一戎², 彭海良², 李峰², 胡岩峰²

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院电子学研究所 微波成像技术国家重点实验室, 北京 100080)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(4 中国科学院空间中心, 北京 100080)

摘 要:应用摄影测量理论,将星载 SAR 图像近似看作一个多中心投影传感器获取的等效影像,基于星载 SAR 共线方程给出了 SAR 图像的自校验直接线性变换定位模型. 选用一景北京地区 RadarSat 影像进行实验. 结果表明,自校验直接线性变换模型表达简单,求解稳定,不需要任何轨道信息和成像参量且校正准确度保持在像素级范围之内,因而该模型适用于星载 SAR 图像的准确定位.

关键词:星载 SAR; 定位; 自校验直接线性变换; 多中心投影; 准确度

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)03-0543-5

0 引言

近年来,伴随着航天摄影测量和遥感技术发展,星载合成孔径雷达(SAR)获取的遥感影像极为丰富,如:RadarSat 影像、ENVISAT 影像等. 遥感影像在应用前必须进行精确地理定位. 当今光学遥感影像的定位方法研究较多,自校验直接线性变换等模型^[1-3]在实际应用中取得较好效果. 相比较而言,星载 SAR 图像的定位方法则相对单一. 传统的基于地面控制点的多项式定位模型回避了成像的几何过程,而直接对影像的变形本身进行数学模拟,适用于地面相对平坦的情况^[4];基于地面控制点的 R-D 校正模型^[5]考虑了 SAR 图像本身的成像特点,因而准确度较高,但是模型形式相对复杂且定向参量容易出现线性相关性,导致实际应用不便. 从摄影测量角度理解,星载光学遥感影像和星载 SAR 影像都是通过各自的共线方程建立了目标点和像点的确定几何关系. 基于此,本文引入星载光学影像自校验直接线性变换模型的定位思想,应用摄影测量共线方程理论,将星载 SAR 图像看成是一个多中心投影传感器获取的等效图像,对星载 SAR 图像的共线方程模型进行了优化,从而得到形式简单、校正准确度较高的星载 SAR 图像自校验直接线性变换定位模型.

1 星载 SAR 成像原理

星载合成孔径雷达(SAR)在飞行中,向垂直轨

道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,获得一系列扫描线,由若干条距离扫描线构成一幅 SAR 图像. 星载 SAR 图像是地面目标的距离投影,一般可分为斜距图像和地距图像. 斜距图像记录了天线至地面目标之间的斜距距离;而地距图像则反映了天线到地面目标之间的水平距离. 图 1 表示星载 SAR 图像的成像几何关系^[6].

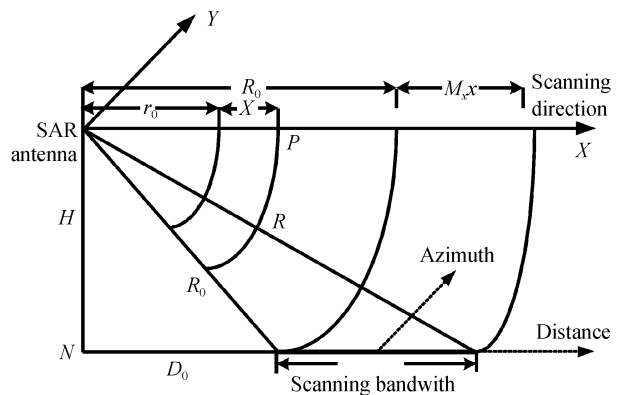


图 1 SAR 成像几何关系

Fig. 1 The imaging geometric formation of SAR

图 1 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, M_x 为距离向比例尺.

由于雷达侧向扫描平台恒垂直于遥感平台运动的速度矢量,则有零多普勒条件方程

$V_x(X_P - X_S) + V_y(Y_P - Y_S) + V_z(Z_P - Z_S) = 0$ (1)
 式中 (X_P, Y_P, Z_P) 为地面点的地面坐标; (X_S, Y_S, Z_S) 为瞬时天线中心的地面坐标; (V_x, V_y, V_z) 则表示了平台的瞬时速度向量.

此外, 由 SAR 成像关系, 设斜距为 R , 即有斜距方程

$$R = M_x(r_0 + x) = \sqrt{(X_P - X_S)^2 + (Y_P - Y_S)^2 + (Z_P - Z_S)^2} \quad (2)$$

式(1)和式(2)构成了用距离和多普勒条件表示的 SAR 图像的成像方程式.

2 基于自校验直接线性变换的定位模型

基于摄影测量共线方程原理, SAR 图像可以看作是一个多中心投影传感器获取的等效影像, 目标点、表达像点和天线中心位于同一条直线上^[6], 如图 2.

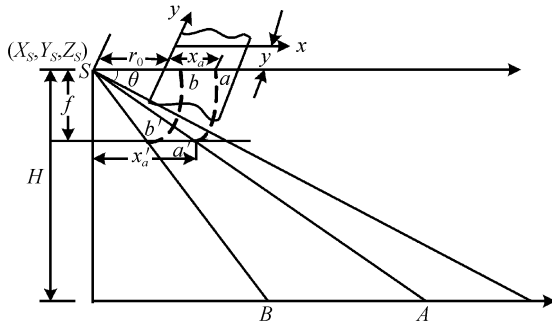


图 2 星载 SAR 多中心投影
 Fig. 2 Multi-center projection formation of satellite SAR

设目标点 A 的地面坐标为 (X_A, Y_A, Z_A) , 目标点 A 在斜距 SAR 图像上的像点为 a , 像点坐标为 (x_a, y_a) , $(X_{S_i}, Y_{S_i}, Z_{S_i})$ 是像点 a 所对应的第 i 条扫描线的天线中心地面坐标; f 为等效焦距; r_0 为影像上的扫描延迟; θ 为对应目标 A 的俯角; a' 是 A 点在等效的地距影像上的像点, 相应的像点坐标为 (x'_a, y'_a) , 则 x_a 和 x'_a 之间关系可表示为

$$x'_a = \sqrt{(r_0 + x_a)^2 \cos^2 \theta} \quad (3)$$

这时, 天线中心 S_i , 像点 a' 和地面点 A 严格满足共线关系, 即有 SAR 图像的共线方程式

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \lambda M_i \begin{bmatrix} x'_a \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{S_i} \\ Y_{S_i} \\ Z_{S_i} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中, λ 是比例因子, M_i 是像点 a 对应的扫描线的姿态参量 $\omega_i, \varphi_i, \kappa_i$ 构成的方向余弦. 设: $M_i = M_0 \Delta M_i$, $M_0 = M(\omega_0)M(\varphi_0)M(\kappa_0)$, $\Delta M_i = M(\Delta\omega_i) \cdot M(\Delta\varphi_i)M(\Delta\kappa)$, 鉴于姿态角的变化为一小值, 即 $\Delta M_i = M(\Delta\omega_i)M(\Delta\varphi_i)M(\Delta\kappa_i) \approx$

$$\begin{bmatrix} 1 & -\Delta\kappa_i & \Delta\varphi_i \\ \Delta\kappa_i & 1 & -\Delta\omega_i \\ -\Delta\varphi_i & \Delta\omega_i & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

如以影像 y 坐标方向表示飞行方向, 由于卫星飞行平稳, 则传感器的外方位元素可近似表示为

$$\begin{cases} X_{S_i} \approx S_{S_0} + k_1 \cdot y_i \\ Y_{S_i} \approx Y_{S_0} + k_2 \cdot y_i \\ Z_{S_i} \approx Z_{S_0} + k_3 \cdot y_i \\ \omega_i = \omega_{i0} + \Delta\omega_i \approx \omega_{i0} + k_4 \cdot y_i \\ \varphi_i = \varphi_{i0} + \Delta\varphi_i \approx \varphi_{i0} + k_5 \cdot y_i \\ \kappa_i = \kappa_{i0} + \Delta\kappa_i \approx \kappa_{i0} + k_6 \cdot y_i \end{cases} \quad (6)$$

则星载 SAR 图像的共线方程可表示为

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \lambda M_0 \Delta M_i \begin{bmatrix} x'_a \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{S_i} \\ Y_{S_i} \\ Z_{S_i} \end{bmatrix} = \lambda M_0 (E + Ky) \begin{bmatrix} (r_0 + x_a) \sqrt{\cos \theta} \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{S_0} \\ Y_{S_0} \\ Z_{S_0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \cdot y_a \quad (7)$$

式中 $K = \begin{bmatrix} 0 & -k_6 & k_5 \\ k_6 & 0 & -k_4 \\ -k_5 & k_4 & 0 \end{bmatrix}$, E 表示单位阵.

因为星载 SAR 传感器在飞行方向上近似平行投影, y 坐标正比于沿飞行方向的径向距离, 因此 $(X_{S_i}, Y_{S_i}, Z_{S_i})$ 可以表示为^[2]

$$\begin{bmatrix} X_{S_i} \\ Y_{S_i} \\ Z_{S_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_{S_0} \\ Y'_{S_0} \\ Z'_{S_0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k'_1 \\ k'_2 \\ k'_3 \end{bmatrix} \cdot (X_A \cos \alpha + Y_A \sin \alpha) \quad (8)$$

式(8)中, $(X'_{S_0}, Y'_{S_0}, Z'_{S_0})$ 与 (k'_1, k'_2, k'_3) 为表示 $(X_{S_0}, Y_{S_0}, Z_{S_0})$ 和 (k_1, k_2, k_3) 的常量. 综合式(7)与式(8), 即

$$\lambda M_0 \begin{bmatrix} (r_0 + x_a) \sqrt{\cos \theta} \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} + \lambda M_0 Ky_a \begin{bmatrix} (r_0 + x_a) \sqrt{\cos \theta} \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X'_{S_0} \\ Y'_{S_0} \\ Z'_{S_0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k'_1 \\ k'_2 \\ k'_3 \end{bmatrix} \cdot (X_A \cos \alpha + Y_A \sin \alpha) \quad (9)$$

鉴于卫星飞行平稳, 离成像区域比较远, 一般达到几百公里到上千公里, 因此星载 SAR 图像对应天线俯角变化非常小, 可理解为一常量. 故式(9)中 θ 为一常量, 整理该式则

$$\lambda \begin{bmatrix} \sqrt{\cos \theta} x_a - k'_5 f y_a + r_0 \sqrt{\cos \theta} \\ (r_0 k_6 \sqrt{\cos \theta} + k_4 f) y_a + k_6 \sqrt{\cos \theta} x_a y_a \\ -f - k_5 (r_0 \sqrt{\cos \theta} y_a + \sqrt{\cos \theta} x_a y_a) \end{bmatrix} =$$

$$M_0^{-1} \begin{bmatrix} (1-k'_1 \cos \alpha)X_A+k'_1 \sin \alpha Y_A-X'_{S0} \\ (1+k'_2 \sin \alpha)Y_A-k'_2 \cos \alpha X_A-Y'_{S0} \\ -k'_3 \cos \alpha X_A+k'_3 \sin \alpha Y_A+Z_A-Z'_{S0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

令 $M_0^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$, 可得

$$\lambda \begin{bmatrix} \sqrt{\cos \theta} x_a - k_5 f y_a + r_0 \sqrt{\cos \theta} \\ (r_0 k_6 \sqrt{\cos \theta} + k_4 f) y_a + k_6 \sqrt{\cos \theta} x_a y_a \\ -f - k_5 (r_0 \sqrt{\cos \theta} y_a + \sqrt{\cos \theta} x_a y_a) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 X_A + l_2 Y_A + l_3 Z_A + l_4 \\ l_5 X_A + l_6 Y_A + l_7 Z_A + l_8 \\ l_9 X_A + l_{10} Y_A + l_{11} Z_A + l_{12} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中, $l_i (i=1 \sim 12)$ 为常量, 其中

$$\begin{aligned} l_1 &= a_{11} - a_{11} k'_1 \cos \alpha - a_{12} k'_2 \cos \alpha - a_{13} k'_3 \cos \alpha \\ l_2 &= a_{11} k'_1 \sin \alpha + a_{12} + a_{12} k'_2 \sin \alpha + a_{13} k'_3 \sin \alpha \\ l_3 &= a_{13} \\ l_4 &= -a_{11} X'_{S0} - a_{12} Y'_{S0} - a_{13} Z'_{S0} \\ l_5 &= a_{21} - a_{21} k'_1 \cos \alpha - a_{22} k'_2 \cos \alpha - a_{23} k'_3 \cos \alpha \\ l_6 &= a_{21} k'_1 \sin \alpha + a_{22} + a_{22} k'_2 \sin \alpha + a_{23} k'_3 \sin \alpha \\ l_7 &= a_{23} \\ l_8 &= -a_{21} X'_{S0} - a_{22} Y'_{S0} - a_{23} Z'_{S0} \\ l_9 &= a_{31} - a_{31} k'_1 \cos \alpha - a_{32} k'_2 \cos \alpha - a_{33} k'_3 \cos \alpha \\ l_{10} &= a_{31} k'_1 \sin \alpha + a_{32} + a_{32} k'_2 \sin \alpha + a_{33} k'_3 \sin \alpha \\ l_{11} &= a_{33} \\ l_{12} &= -a_{31} X'_{S0} - a_{32} Y'_{S0} - a_{33} Z'_{S0} \end{aligned}$$

事实上, 星载 SAR 的侧视角度变化极小, 因此对于式(11)中的 k_5 影响可以忽略, 同时, 考虑到像素坐标 (x, y) 与像平面坐标 (x_a, y_a) 之间的关系

$$\begin{cases} x_a = m_x x + x_0 \\ y_a = m_y y + y_0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, m_x 为斜距图像的距离向分辨率, m_y 为斜距图像的方位向分辨率, (x_0, y_0) 为坐标原点的偏移量. 将式(12)带入式(11), 则

$$\begin{cases} x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \\ y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} + L_{12} x y \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{(-fl_1 - x_0 l_9 \cos \theta - r_0 l_9 \sqrt{\cos \theta})}{m_x \sqrt{\cos \theta}}, \\ T_2 &= \frac{(-fl_2 - x_0 l_{10} \cos \theta - r_0 l_{10} \sqrt{\cos \theta})}{m_x \sqrt{\cos \theta}}, \\ T_3 &= \frac{(-fl_3 - x_0 l_{11} \cos \theta - r_0 l_{11} \sqrt{\cos \theta})}{m_x \sqrt{\cos \theta}}, \\ T_4 &= \frac{(-fl_4 - x_0 l_{12} \cos \theta - r_0 l_{12} \sqrt{\cos \theta})}{m_x \sqrt{\cos \theta}} \\ L_1 &= \frac{T_1}{l_{12}}, L_2 = \frac{T_2}{l_{12}}, L_3 = \frac{T_3}{l_{12}}, L_4 = \frac{T_4}{l_{12}} \\ T_5 &= r_0 k_6 y_0 \sqrt{\cos \theta} + k_4 f y_0 + k_6 x_0 y_0 \\ T_6 &= r_0 k_6 m_y \sqrt{\cos \theta} + k_4 f m_y + k_6 m_y x_0 \sqrt{\cos \theta} \\ L_5 &= \frac{(-fl_5 - T_1 k_6 m_x y_0 \sqrt{\cos \theta} - T_5 l_9)}{T_6 l_{12}}, \\ L_6 &= \frac{(-fl_6 - T_2 k_6 m_x y_0 \sqrt{\cos \theta} - T_5 l_{10})}{T_6 l_{12}}, \\ L_7 &= \frac{(-fl_7 - T_3 k_6 m_x y_0 \sqrt{\cos \theta} - T_5 l_{11})}{T_6 l_{12}}, \\ L_8 &= \frac{(-fl_8 - T_4 k_6 m_x y_0 \sqrt{\cos \theta} - T_5 l_{12})}{T_6 l_{12}}, \\ L_9 &= \frac{l_9}{l_{12}}, L_{10} = \frac{l_{10}}{l_{12}}, L_{11} = \frac{l_{11}}{l_{12}}, L_{12} = \frac{k_6 m_x m_y \sqrt{\cos \theta}}{T_6} \end{aligned}$$

通过以上详细推导, 式(13)给出了星载 SAR 图像的自校验直接线性变换定位模型. 从该模型的表达形式上可以看出, 未知参量 $L_i (i=1 \sim 12)$ 的求解只需要六个控制点, 同时新的定位方法也不需要知道待定位 SAR 图像的轨道信息及成像参量, 从而大大简化了星载 SAR 图像的定位. 基于自校验直接线性变换的校正模型与多项式校正模型及距离-多普勒模型的综合比较如表 1.

表 1 星载 SAR 图像定位模型综合比较

算法	对轨道和传感器参数要求	算法复杂性(影像像素个数为 N)	必须的控制点数目	准确度及其性能
一般三次多项式	无	(18 次加法+40 次乘法) $\times N$	10	平坦地区准确度较高, 解算复杂, 计算量大.
距离-多普勒模型	近地点斜距、雷达波长、斜距分辨率、多普勒平移参量, 一般都已知或在成像中获取.	迭代求解	6	解算复杂, 模型考虑了雷达成像的机理, 但定向参量可能存在强相关性.
本文自校验直接线性变换模型	无	(10 次加法+11 次乘法) $\times N$	6	解算简单、求解稳定, 不需要知道卫星轨道信息和成像参量.

3 实验结果及分析

基于以上理论,本文选用一景北京地区的RaderSat斜距影像^[7-8]进行实验.影像大小为7555×11378,图像分辨率为10 m;控制点采自1:50000地形图上且均匀分布,固定12个检查点以检验比较不同定

位模型不同控制点数目定位准确度.实验中选用了常用的一般三次多项式模型,距离-多普勒模型及本文的自校验直接线性变化模型,表2给出了三种校正模型不同控制点数目定位准确度;图3给出了三种校正模型检查点定位准确度变化曲线.

表2 RadarSat影像的定位准确度(单位:像素)

定位模型	控制点数目	控制点 X 轴 中误差	控制点 Y 轴 中误差	检查点 数目	检查点 X 轴 中误差	检查点 Y 轴 中误差
一般三次 多项式模型	10	0.00	0.00	12	8.85	7.32
	14	0.76	1.14		2.26	4.45
	19	0.89	1.29		1.85	3.13
	24	0.83	1.44		1.82	2.42
	29	1.01	1.54		1.88	1.73
	34	1.08	1.50		1.78	1.86
距离-多普勒 模型	6	0.64	1.71	12	4.67	2.05
	10	1.60	2.51		2.69	2.65
	14	1.73	2.77		3.94	3.63
	19	2.02	2.64		3.73	3.25
	24	2.12	2.48		3.56	2.89
	29	2.34	2.39		2.45	2.93
文中自校 验直接线性 变换模型	34	2.31	2.33	12	2.40	3.09
	6	0.20	0.03		9.05	8.23
	10	1.06	1.40		2.53	3.39
	14	1.02	1.55		2.06	2.13
	19	1.41	1.74		1.86	2.03
	24	1.44	1.68		1.81	1.95
	29	1.35	1.65	1.87	1.94	
	34	1.34	1.66	1.78	2.01	

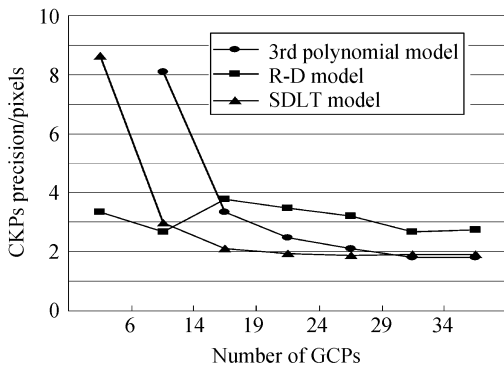


图3 不同校正模型检查点定位准确度变化曲线
Fig.3 The variety curve of check points location accuracy of different models

从表2和图3可以看出,一般三次多项式模型在地形平坦地区能取得较好的定位准确度;距离-多普勒模型定位准确度变化平稳,用较少的控制点即可得到较高的定位准确度,但在校正过程中需要已知成像参量;本文提出的定位模型,虽然在控制点较少时定位误差较大,但其表达形式简单,且在校正过程中不需要知道任何轨道信息和成像参量,定位准确度收敛快,因而在实际中有一定的应用价值.

4 结论

本文给出的星载SAR自校验直接线性变换模型是在理解光学遥感影像自校验直接线性变换模型原理的基础上提出的.在该模型的推导过程中,星载SAR图像被近似看成多中心投影传感器获取的等效影像,从而基于星载SAR共线方程得到了文中的定位模型.实验结果表明,自校验直接线性模型准确度高,可以作为星载SAR图像的一种有效定位模型在实际中应用.

参考文献

[1] WEI Zhong-quan. Synthetic aperture radar satellite [M]. Beijing: Publishing House of Science, 2001: 45-46.
魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 45-46.

[2] WANG Younian. Automated triangulation of linear scanner imagery[C]. Proceedings of ISPRS Work Groups I/1, I/3, IV/4 on "Sensors and Mapping from Space 1999". Hanorer, Germany, 1999: 158-162.

[3] ZHU Shu-long, SHI Wen-zhong, ZHANG Yan, et al. Precision comparison of several algorithms for approximate rectification of linear array push-broom imagery[J]. Journal of Remote

- Sensing, 2004, **8**(3): 220-226.
- [4] ZHANG Yong-sheng, GONG Dan-chao, *et al.* The application of high resolution satellite - the imaging model, processing algorithm & application technology [M]. Beijing: Publishing House of Science, 2004: 30-31.
张永生, 巩丹超, 等. 高分辨率遥感卫星应用-成像模型、处理算法及应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 30-31.
- [5] YOU Hong-jian, DING Chi-biao, WU Yi-rong. Rectifying space-borne SAR image precisely based on GCP/DEM [J]. *Journal of Electronics of Information Technology*, 2004, **26** (Suppl): 283-288.
尤红建, 丁赤彪, 吴一戎. 基于 GCP/DEM 的星载 SAR 图像高精度对地定位[J]. 电子与信息学报, 2004, **26** (增刊): 283-288.
- [6] TANG Guo-an, ZHANG You-shun, LIU Yong-mei, *et al.* Remote sensing image processing [M]. Beijing: Publishing House of Science, 2004: 98-100.
汤国安, 张友顺, 刘咏梅, 等. 遥感数字图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 98-100.
- [7] LI Feng, HU Yan-feng, ZENG Zhi-min, *et al.* The design and research for a model of content-based retrieval in remote sensing image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1522-1525.
李峰, 胡岩峰, 曾志明, 等. 一种遥感影像基于内容检索模型的研究与设计[J]. 光子学报, 2004, **33**(12): 1522-1525.
- [8] HU Yan-feng, LIU Bo, LI Feng, *et al.* An image change detection method using statistical analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 146-149.
胡岩峰, 刘波, 李峰, 等. 一种基于统计分析的图像变化检测方法[J]. 光子学报, 2005, **34**(1): 146-149.

Study of Satellite SAR Imagery Location Based on Self-calibration Direct Linear Transformation

LI Li-gang^{1,2,3,4}, YOU Hong-jian², LIU Bo^{1,4}, WU Yi-rong², PENG Hai-liang², LI Feng², HU Yan-feng²

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China*)

(2 *Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, the National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100080, China*)

(3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

(4 *Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Received date: 2005-12-12

Abstract: The satellite SAR imagery was regarded as an image which was acquired from the multi-center projection sensor approximately based on photogrammetry theory. The satellite SAR collinearity equation was revised and the self-calibration direct linear transformation model for satellite SAR was proposed. As an example, the RadarSat Imagery was tested. Experiment result demonstrates that the new model formulation is simple and the resolution is stable without any orbit ephemeris and imaging parameters, and location accuracy can also reach pixels. So self-calibration direct linear transformation model of satellite SAR can be applied in practice.

Key words: Satellite SAR; Location; Self-calibration direct linear transformation; Multi-center projection; Accuracy



LI Li-gang was born in June, 1979, and in Gansu Province. He received his B. S. degree from Northwest Normal University in 2001. Now he is a Ph. D. candidate at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, and is studying at Institute of Electronics of CAS. His current research interest is image processing of remote sensing.