

分析法和数值解算法相结合的 星载 SAR 直接定位算法

陈尔学 李增元

(中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要 星载合成孔径雷达(SAR)直接定位算法是发展 SAR 影像椭球表面校正地理编码(GEC)和地形校正地理编码(GTC)算法的基础。发展高精度的直接定位算法对促进 SAR 影像的应用具有重要意义。本文在距离-多普勒(RD)定位模型定位算法的基础上,发展了一种将纯分析法(AGM)和纯数值计算法相结合的算法(AIRGM)。新的定位算法兼有纯分析法和纯数值计算法的优点。利用一景 ERS-2 SAR SLC 数据,采用两种精度评价方法,将所发展的算法与现有的两种算法的定位精度进行了对比。第1种精度评价方法以影像产品中提供的四角点大地坐标为参考,第2种方法以从1:5万地形图上获取的14个控制点为参考。评价结果表明 AIRGM 算法不仅定位精度较高,而且执行效率比纯粹的数值解算法(ASF)有了很大的提高。

关键词 星载合成孔径雷达 距离-多普勒定位模型 SAR 直接定位 地理编码

中图分类号: TP721.2 TP751.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)08-1105-05

Space-borne SAR Geo-location Algorithm Integrating Pure Analysis and Numerical Geo-location Methods

CHEN Er-xue, LI Zeng-yuan

(Institute of Forest Resources Information Techniques, Beijing 100091)

Abstract The geo-location algorithm of Space-borne Synthetic Aperture Radar(SAR) is the fundamental for developing geocoded-ellipsoid correction(GEC) and geocoded-terrain correction(GTC) algorithm, so it is very important to develop high accuracy geo-location algorithm for the application of SAR imagery. After detailed investigation of the currently available SAR geo-location algorithms, a new geo-location methodology AIRGM (Analysis and Iterating Routes Based Geolocation Method) was developed. AIRGM was developed from the pure analysis geo-location method (AGM) by integrating numerical iteration routes into AGM. So this new geo-location methodology has advantages of both pure analysis method (efficient) and pure numerical method (high geolocation accuracy). Applying the three geolocation methods to one scene of ERS-2 SAR SLC imagery, the geolocation accuracy of AIRGM was compared with the other two published geolocation methodologies (ASF and AGM) through two kinds of validation method. The first validation method takes the geographic coordinate of the four image corner points provided with SAR data as reference, while the second method takes 14 ground control points(GCPs) collected from 1:50 000 geographical map sheets as reference. It has been shown that the new geo-location algorithm can achieve higher geo-location accuracy, and the efficiency of geo-location processing is much higher than the pure numerical geo-location method(ASF), which is built upon many iteration routes.

Keywords space-borne SAR, RD geo-location model, direct geo-location, geocoding

1 引言

SAR(合成孔径雷达)影像直接定位是指由

SAR 影像的行列号(i, j)出发,根据 RD(距离-多普勒)定位模型解算出该像元在某一确定的大地椭球表面上的大地坐标的过程。RD 定位模型是由 Brown^[1]首先提出, Curlander^[2]发展了该模型,并给

基金项目:国家“863”项目(2005AA132030)

收稿日期:2005-04-06;改回日期:2005-10-17

第一作者简介:陈尔学(1968~),副研究员,博士。主要研究方向为合成孔径雷达应用、星载雷达遥感信息处理应用软件(SARINFORS)开发。E-mail: chenerx@forestry.ac.cn

$$R_L = \sqrt{\frac{R_c^2 R_p^2}{R_c^2 \sin^2(\delta_c) + R_p^2 \cos^2(\delta_c)}} \quad (4)$$

这样,在三角形 OST 中,3 个边长 R 、 R_s 和 R_L 都为已知值,则由下式可以求出 α

$$\cos(\alpha) = \frac{R_s^2 + R_L^2 - R^2}{2R_s R_L} \quad (5)$$

目标点 T 就在以 R_L 为半径以 α 为张角在地球表面所画的近似圆上。要确定 T 在该圆周上的具体位置,只要确定 $S'T$ 与 $S'N$ 所在的大圆的夹角 β 即可。假如变动 β ,则目标点的位置 T 将随之发生变化,由卫星 S 与 T 的相对位置和速度确定的多普勒频率 f_d 也会随之发生变化,若 f_{dc} 等于实际的 f_d 值,这时的 β 就对应 T 的真实位置。这是从几何上对 AGM 定位原理的直观解释。下面是利用多普勒频率方程求算 β 的解析式的推导过程。

(1) 建立局部坐标系 $S'-xyz$

如图 2 所示, $S'-xyz$ 为新建的局部坐标系。 S' 为坐标原点, $S'z$ 轴指向 S ; $S'x$ 轴位于 $S'N$ 经线平面内并与 $S'z$ 垂直; $S'y$ 垂直于平面 $S'xz$, 并使 $S'-xyz$ 成右手坐标系。

在 $O-XYZ$ 地心坐标系 (ECR) 中卫星的位置矢量 R_{sc} 和速度矢量 V_{sc} 是已知的。现在需要将 R_{sc} 和 V_{sc} 转换到局部坐标系 $S'-xyz$ 中, 转换结果分别用 R_s 和 V_s 表示 (注意和 R_{sc} 、 V_{sc} 相区别)。

(2) 求算星下点的地心经纬度坐标 (L_s, δ_s)

$$\tan(L_s) = \frac{Y_s}{X_s} \quad (6)$$

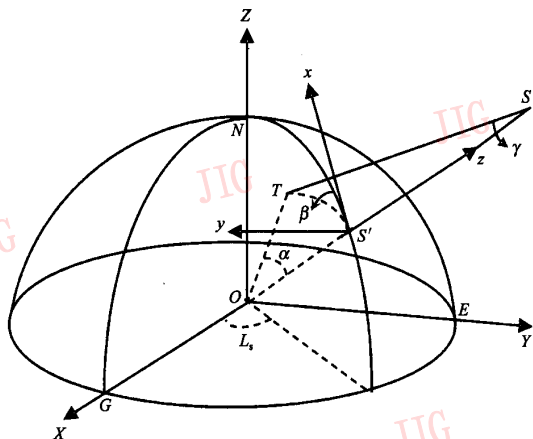


图 2 AGM 解算方法局部坐标系的定义

Fig.2 Definition of the local coordinate system for AGM model solving method

$$\tan(\delta_s) = \frac{Z_s}{\sqrt{X_s^2 + Y_s^2}} \quad (7)$$

(3) 将 ECR 坐标矢量 (R_{sc}, V_{sc}) 转换为局部坐标系坐标 (R_s, V_s)

根据坐标系定义可以直接确定 R_s

$$R_s = (0, 0, z_s)^T \quad (8)$$

其中, $z_s = |R_{sc}| - R_L$ 。设

$$V_s = (x_v, y_v, z_v)^T \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} x_v = -X_v \sin(\delta_s) \cos(L_s) - Y_v \sin(\delta_s) \sin(L_s) + Z_v \cos(\delta_s) \\ y_v = X_v \sin(L_s) - Y_v \cos(L_s) \\ z_v = X_v \cos(\delta_s) \cos(L_s) + Y_v \cos(\delta_s) \sin(L_s) + Z_v \sin(\delta_s) \end{cases} \quad (10)$$

(4) 由多普勒频率方程解出 β

在局部坐标系 $S'-xyz$ 中多普勒方程的定义为

$$f_d = -\frac{2}{\lambda R} (R_s - R_t) \cdot V_s \quad (11)$$

其中, R_t 表示局部坐标系中地物位置矢量 $S'T$, 由图 2 可知:

$$R_t = (R_L \sin(\alpha) \cos(\beta), R_L \sin(\alpha) \sin(\beta), -R_L(1 - \cos(\alpha)))^T \quad (12)$$

将式 (8)、(9)、(12) 代入式 (11) 整理得

$$f_d = -\frac{2}{\lambda R} [x_v (-R_L \sin(\alpha) \cos(\beta)) + y_v (-R_L \sin(\alpha) \sin(\beta)) + z_v (Z_s + R_L(1 - \cos(\alpha)))] \quad (13)$$

设

$$\begin{cases} A = \frac{2}{\lambda R} x_v R_L \sin(\alpha) \\ B = \frac{2}{\lambda R} y_v R_L \sin(\alpha) \\ C = -\frac{2}{\lambda R} z_v (R_s - R_L \cos(\alpha)) - f_d \end{cases} \quad (14)$$

则式 (13) 可写为

$$A \cos(\beta) + B \sin(\beta) + C = 0 \quad (15)$$

则式 (15) 的解为

$$\cos(\beta) = \frac{-AC \pm B \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2} \quad (16)$$

其中, 加减号的选择可以根据雷达视向确定, 右视时选择加号, 左视时选择减号。

(5) 计算目标点的地理经纬度坐标

至此, α 和 β 的值已经求出, 目标点 T 的位置也由这两个角度唯一确定下来, 利用式 (17) 就可以由 α 、 β 及星下点 S' 的地心经纬度坐标 $S'(L_s, \delta_s)$ 计算

出 T 点的地心经纬坐标 $T(L_{11}, \delta_{11})$ 来。

$$\begin{cases} \cos(90^\circ - \delta_{11}) = \cos(\alpha) \sin(\delta_s) + \sin(\alpha) \cos(\delta_s) \cos(\beta) \\ \cos(L_s - L_{11}) = \frac{\cos(\alpha) - \sin(\delta_s) \sin(\delta_{11})}{\cos(\delta_s) \cos(\delta_{11})} \end{cases} \quad (17)$$

进一步可以利用式(18),将 T 点的地心经纬度转换为地理经纬度 $T(L_i, \delta_i)$ 。

$$\begin{cases} L_i = L_{11} \\ \delta_i = \arctan\left(\frac{R_s^2 \tan(\delta_{11})}{R_p^2}\right) \end{cases} \quad (18)$$

2.3 AIRGM 定位方法

2.2 节在“目标点到地心的距离 $|R_{ic}|$ 是已知的”这个假设前提下,给出了 RD 定位模型解析算法 AGM。由于采用地球椭球作为地球模型,若不知道目标点的坐标,是无法计算得到 OT' 的值的,因此在式(5)中,假设 OT' 近似等于 R_L 。下面将给出一种在 AGM 算法基础上,通过多次迭代,使 OT' 逐渐趋近其实际值的定位方法(AIRGM)。

(1) R_L 初值的计算

首先将卫星位置坐标 $(X_s, Y_s, Z_s)^T$ 转换为卫星星下点地理经纬度和卫星高度坐标 (L'_s, δ'_s, H_s) ,则地球当地圆半径 R_L 的初始值由式(19)近似算出。也可利用式(4)计算 R_L 的近似值。这两种 R_L 计算方法不会影响 AIRGM 最终定位结果,但却会影响 AGM 的结果。

$$R_L = |R_{ic}| - H_s \quad (19)$$

(2) 根据 AGM 计算得到目标点在 $O-XYZ$ 中的坐标 (X_i, Y_i, Z_i) ;

(3) 将 (X_i, Y_i, Z_i) 转换为目标点的地理经纬度和高程坐标 (L_i, δ_i, H_{ic}) ,则可以计算出新的地球当地半径

$$R'_L = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2} - H_{ic} \quad (20)$$

如果 $|R'_L - R_L| > 0.01$,则令 $R_L = R'_L$,转第 2 步;否则,转下一步。

(4) 当前 (L_i, δ_i) 的值就是最终的定位结果,退出。

3 与现有算法的比较评价

3.1 比较评价方法

实验数据为一景 ERS-2 SAR SLC 数据,获取时间为 1997 年 7 月 26 日,覆盖区域为广东省增城市。该数据由欧洲空间局(ESA)的 ESRIN 处理,处理器

已经对影像 4 个角点进行了直接定位,定位结果存储在 SAR 元数据中。由 SAR 处理器所提供的这 4 个角点坐标可以作为参考点比较评价本文研究所涉及的几种定位算法的相对定位精度。另外还将 SAR 影像和所覆盖区域的 1:5 万地形图相对照,人工量测获取了 14 个控制点,以进行基于控制点的定位精度评价。具体评价方法如下:

(1) 基于影像 4 角点参考坐标

设影像总行数为 M ,总列数为 N 。元数据中所提供的 4 个角点的影像坐标分别为: $P_1(1, 1)$, $P_2(1, N)$, $P_3(M, 1)$, $P_4(M, N)$ 。从元数据中提取 P_1, P_2, P_3, P_4 点的大地坐标 (L_n, δ_n) ;利用待比较评价的定位算法分别对这 4 个点进行地理定位,得到相应的大地坐标 (L'_n, δ'_n) ,其中, $n = 1, 2, 3, 4$ 。则相对误差绝对值的平均值为

$$MABSE_L = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 |L'_n - L_n| \quad (21)$$

$$MABSE_\delta = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 |\delta'_n - \delta_n|$$

本文定位结果的有效数字位数和元数据中给出的经纬度的有效数字位数保持一致(小数点后 6 位)。

(2) 以控制点投影直角坐标为参考

获取了 N_g 个控制点,控制点的影像行列号坐标为 (i_k, j_k) ,相应地从地形图上量测的 TM (transvers mercator) 投影直角坐标为 (X_k, Y_k) , $k = 1, 2, \dots, N_g$ 。本试验中 $N_g = 14$ 。分别利用本文介绍的 3 种定位算法对每个控制点 (i_k, j_k) 进行定位,得到相应的大地坐标 (L'_k, δ'_k) ,经过 TM 投影转换,得到相应的 TM 投影直角坐标 (X'_k, Y'_k) 。利用式(22)分别东西、南北向计算均方根误差(RMSE)作为精度评价指标。

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_g} (X'_k - X_k)^2}{N_g}} \quad (22)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_g} (Y'_k - Y_k)^2}{N_g}}$$

(3) 运行效率评价

分别采用待比较评价的几种直接定位算法,对 SAR 影像行号从 0 到 1000,列号从 0 到 1000 的一个影像窗口,共 100 万个像元进行直接定位处理,记录所消耗的总时间。

3.2 评价结果与分析

表 1 列出了 ASF、AGM 和 AIRGM 3 种直接定位方法的相对定位误差及处理时间。从表 1 可以看出: AIRGM 在纬度方向的相对定位精度最高,而在经度方向 ASF 方法的相对精度最高。若从经纬两个方向的综合误差来看, AIRGM 相对定位误差比 ASF 方法及 AGM 方法都小。而 AGM 在经度方向的误差为 294.725×10^{-5} 度, 纬度方向为 76.625×10^{-5} 度, 是 3 种方法中误差最大的。从处理时间上可以明显看出, 纯分析法 AGM 要比数值分析法 ASF 快 15 倍以上。AIRGM 方法虽然处理时间是 AGM 的两倍多, 但和 ASF 方法相比要快 6 倍以上。总之, AIRGM 方法兼有纯数值解法定位精度较高和纯分析法运行速度较快的优点, 在总的定位精度比纯分析法有所提高的同时, 又保持了较高的处理速度。

表 1 3 种算法的影像角点定位精度及执行效率对比
Tab.1 Comparison of the geo-location accuracy and processing efficiency of three methods taking SAR image corner locations in the product meta file as reference

定位方法	定位误差 (10^{-5} 度)			处理时间 (s)
	经度方向 ($MABSE_L$)	纬度方向 ($MABSE_B$)	两个方向平均	
ASF	72.400	47.925	60.1625	880
AGM	294.725	76.625	185.675	52
AIRGM	87.625	19.650	53.6375	137

表 2 是控制点精度检验结果。在东西方向 AIRSM 方法 $RMSE_x$ 误差为 88.23m, 是 3 种方法中最小的, 约是 AGM 方法的 1/4。在南北向, AIRGM 的 $RMSE_y$ 为 48.44m, 是 ASF 的 2.0 倍, 是 AGM 的 1.8 倍。从两个方向的平均 $RMSE$ 可以看出, AIRGM 比 AGM 定位误差小了约 2 倍, 仅比 ASF 误差大 7.29m。

表 2 3 种算法的控制点定位精度对比
Tab.2 Comparison of the geo-location accuracy of three methods taking ground control points (GCPs) as reference

定位方法	定位误差 (m)		
	东西向 ($RMSE_x$)	南北向 ($RMSE_y$)	两个方向平均
ASF	98.41	23.73	61.07
AGM	365.03	26.71	195.87
AIRGM	88.23	48.44	68.36

因此从表 2 可以得到和表 1 一致的结论: AIRGM 定位精度总得来看比 AGM 有较大提高, 特别是在东西向上, 定位误差比 AGM 减小了近 3 倍。

4 结 论

本文发展了一种将分析法和数值解算法相结合的 RD 模型直接定位解法。这种方法与国内已公开发表的纯分析直接定位算法的主要不同在于利用数值解算法实现对地球椭球模型的迭代趋进, 从而弥补了纯分析法由于将地球椭球模型简化而引起的定位误差相对增大问题。利用实例数据对 3 种定位方法的定位精度比较评价结果表明, AIRGM 算法具有较高的定位精度, 同时执行效率比纯粹的数值算法有了很大的提高。

参考文献 (References)

- 1 Brown W E. Applications of SEASAT SAR digitally corrected imagery for sea ice dynamics[A]. In: American Geophysics[C], Baltimore, Maryland, USA, 1981; 25 ~ 29.
- 2 Curlander J C. Location of space-borne SAR imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 1982, 20 (3): 359 ~ 364.
- 3 Yuan Xiao-kang. Introduce to Spaceborne Synthetic Aperture [M]. Beijing: New Times Press, 2003: 278 ~ 279. [袁孝康著. 星载合成孔径雷达导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 278 ~ 279.]
- 4 Zhou Jin-qing: Study of Practical R-D Geolocation Model for Spaceborne SAR [D]. Beijing: China Remote Sensing Satellite Ground Station of Chinese Academy of Science, 2000. [周金萍. 星载 SAR 图象的实用化 R-D 定位模型的研究 [D]. 北京: 中科院遥感卫星地面站, 2000.]
- 5 Zhou Jin-ping, Tang Ling, Li Chuan-rong. Two practical R-D geolocation model and their accuracy validation for space-borne SAR imagery [J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5 (3): 191 ~ 197. [周金萍, 唐伶俐, 李传荣. 星载 SAR 图像的两种实用化 R-D 定位模型及其精度比较 [J]. 遥感学报, 2001, 5(3): 191 ~ 197.]
- 6 Zhang Yong-hong, Lin Zong-jian, Zhang Ji-xian, et al. Geometric rectification of SAR images [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinia, 2002, 31 (2): 134 ~ 138. [张永红, 林宗坚, 张继贤等. SAR 影像几何校正 [J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 134 ~ 138.]
- 7 Li F K, Johnson, W T K. Ambiguities in spaceborne synthetic aperture radar system [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19 (3): 389 ~ 396.
- 8 Yuan Xiao-kang. Geolocation method for spaceborne synthetic aperture radar [J]. Aerospace Shanghai, 1997, 14 (6): 51 ~ 57. [袁孝康. 星载合成孔径雷达的目标定位方法 [J]. 上海航天, 1997, 14(6): 51 ~ 57.]