

基于递推公式的星载 SAR 高效正向定位算法

李锦伟* 李真芳 侯英龙 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文提出一种基于递推公式的星载合成孔径雷达(SAR)高效正向定位算法。该算法利用 3 组递推公式计算待定位像素与参考像素之间的 3 轴位置增量,输入参数为两者之间的高程差、斜距差和方位时间差,然后将位置增量与参考点的位置相加即可求得待定位点的定位位置。3 组递推公式通过分别以斜距、方位时间和高程为变量,并对定位方程组求导获取。该算法避免了 3 维格网建立、系数拟合和插值操作,仿真和实测数据定位结果验证了该文方法的精确性和有效性。

关键词: 星载合成孔径雷达; 定位; 递推公式

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)02-0409-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00609

A Novel Efficient Spaceborne SAR Geolocation Method Based on Recursion Formulae

Li Jin-wei Li Zhen-fang Hou Ying-long Bao Zheng

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel efficient geolocation method for spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) is proposed based on recursion formulae in this paper. In this method, three groups of recursion formulae are utilized to compute the three-axis position increments between the position-unknown pixel and the adjacent position-determined pixel, i.e. the reference pixel, with the input increments of the height, slant range and azimuth time between the two pixels. Subsequently, these increments are added to the position of the reference pixel to obtain the position of the position-unknown pixel. Regarding respectively the height, slant range and azimuth time as the variables, these recursion formulae are acquired by differentiating the geolocation equations. Consequently, the construction of three-dimensional grid, coefficients fitting and interpolation are avoided in this method. The geolocation results of simulated and real data validate the accuracy and effectiveness of this method.

Key words: Spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR); Geolocation; Recursion formulae

1 引言

近年来, SAR 定位在国内外已得到广泛的研究^[1-8]。与反向定位算法相比,正向定位算法应用于 SAR 复图像对几何配准^[9,10]、干涉条纹反演^[11-13]、SAR 图像反演^[14]等处理时具有更高的效率,生成的斜平面高程图可用于辅助 SAR 精确成像^[15]和干涉相位解缠^[16,17]等处理。因此,高效的 SAR 正向定位算法研究具有重要的意义。

文献[1]提出了星载 SAR 定位常用的距离-多普勒模型,这个模型被广泛地应用于星载 SAR 图像的定位、地理编码等处理,但利用迭代方法获取距离-多普勒定位模型数值解的运算量较大^[2]。文献[2]假设 SAR 图像中像素 M 的高程与其 3 维空间位置之

间的关系可分别通过 3 个多项式来描述,通过在 SAR 图像中选择 2 维格网,将 N 个假定高程分别代入椭球模型中,迭代求解该像素的 3 维位置,从而建立 3 维像素格网。然后,利用多项式拟合和系数插值得到每个像素的空间位置与高程关系的多项式,将像素高程代入多项式即可完成 SAR 图像的快速定位。文献[3]提出了一种高效的 SAR 反定位算法,通过在数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)中建立 3 维格网,利用有理函数模型(Rational Function Model, RFM)拟合 DEM 中目标点的经纬度、高程与该点在 SAR 图像中坐标的关系,然后将 SAR 图像场景对应 DEM 中的每个点都投影到 SAR 图像中,最后插值计算 SAR 图像像素的位置。

本文提出了一种基于递推公式的星载 SAR 高效正向定位算法。在 SAR 图像中选择 2 维格网,迭代获取格网像素的定位位置,然后利用 3 组递推公式和格网像素的定位位置求取得待定位的非格网像素的定位位置,避免了 3 维格网建立、系数拟合和插

2013-05-03 收到, 2013-09-16 改回

国家自然科学基金(41001282, 60802074, 40871205)和中央高校基本科研业务费(K5051302014)资助课题

*通信作者: 李锦伟 ljw2006147@sina.com

值操作。本文结构如下：第2节介绍了本文算法的原理和处理流程，提出了一种改进的非格网像素高程获取方法；第3节通过仿真实验和实测数据处理验证了算法的精确性和有效性；最后总结全文。

2 算法原理

2.1 星载 SAR 定位模型

星载 SAR 常用如式(1)~式(3)所示的距离-多普勒模型进行目标定位^[1,2]:

$$R_s = |\mathbf{P}(t) - \mathbf{T}| \quad (1)$$

$$f_{dc} = \frac{-2(\mathbf{P}(t) - \mathbf{T}) \cdot \mathbf{V}(t)}{\lambda |\mathbf{P}(t) - \mathbf{T}|} \quad (2)$$

$$\frac{x_T^2 + y_T^2}{(R_e + h)^2} + \frac{z_T^2}{R_p^2} = 1 \quad (3)$$

其中 $\mathbf{T} = (x_T, y_T, z_T)$ 表示目标点的 3 维位置, $\mathbf{P}(t) = (p_x, p_y, p_z)$ 表示卫星位置矢量, $\mathbf{V}(t) = (v_x, v_y, v_z)$ 表示卫星相对于目标的速度矢量, $\mathbf{P}(t)$ 和 $\mathbf{V}(t)$ 是随时间变化的。 R_s 表示目标到雷达的斜距, λ 表示波长, f_{dc} 表示成像多普勒中心, 即构造方位匹配滤波器时选择的参考多普勒频率, R_e 和 R_p 分别表示赤道和极地半径, 且 $R_p = (1-f)(R_e + h)$, f 为参考椭球的扁率, h 为目标点高程。

2.2 定位模型的求解

在 SAR 图像中选择 2 维格网, 将 SAR 图像的像素分为格网像素(即参考像素)和非格网像素, 参考像素的位置通过迭代方法求取。然后利用 3 组递推公式计算待定位的非格网像素与参考像素之间的 3 轴位置增量, 将位置增量与参考像素的位置相加即可求得待定位像素的定位位置。这 3 组递推公式通过分别假设斜距、方位时间和高程为变量, 并对定位方程组求导获取。假定 \mathbf{T} , $\mathbf{P}(t)$ 和 $\mathbf{V}(t)$ 都定义在 WGS84 坐标系中, 下面给出递推公式的推导。

递推公式组 I: 假设待定位点 $\mathbf{T}_1 = (x_{T_1}, y_{T_1}, z_{T_1})$ 与参考点 \mathbf{T} 具有相同的方位时间和高程, 斜距相差 ΔR_s , 将斜距 R_s 作为变量, 对式(1)~式(3)求导, 然后对求导后的方程组进行求解, 得到 \mathbf{T}_1 和 \mathbf{T} 之间的位置增量 $\Delta_{R_s} = [\Delta x_{R_s}, \Delta y_{R_s}, \Delta z_{R_s}]^T$ 与 ΔR_s 的关系为

$$\Delta_{R_s} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_T}{\partial R_s} \\ \frac{\partial y_T}{\partial R_s} \\ \frac{\partial z_T}{\partial R_s} \end{bmatrix} \Delta R_s = \begin{bmatrix} \frac{R_s [(1-f)^2 y_T v_z - z_T v_y] - E}{D} \\ \frac{R_s [z_T v_x - (1-f)^2 x_T v_z] - F}{D} \\ \frac{R_s (1-f)^2 [x_T v_y - y_T v_x] - G}{D} \end{bmatrix} \Delta R_s \quad (4)$$

其中

$$D = (x_T - p_x) [(1-f)^2 v_z y_T - v_y z_T] - (y_T - p_y) [(1-f)^2 v_z x_T - v_x z_T] + (1-f)^2 (z_T - p_z) (v_y x_T - v_x y_T) \quad (5)$$

$$E = \frac{1}{2} \lambda f_{dc} [z_T (y_T - p_y) - (1-f)^2 y_T (z_T - p_z)] \quad (6)$$

$$F = \frac{1}{2} \lambda f_{dc} [(1-f)^2 x_T (z_T - p_z) - z_T (x_T - p_x)] \quad (7)$$

$$G = \frac{1}{2} \lambda f_{dc} (1-f)^2 [(x_T - p_x) y_T - (y_T - p_y) x_T] \quad (8)$$

递推公式组 II: 假设待定位点 $\mathbf{T}_2 = (x_{T_2}, y_{T_2}, z_{T_2})$ 与参考点 \mathbf{T}_1 具有相同的斜距和高程, 方位时间相差 Δt , 将方位时间 t 作为变量, 对式(1)~式(3)求导, 然后对求导后的方程组进行求解, 得到 \mathbf{T}_2 和 \mathbf{T}_1 之间的位置增量 $\Delta_t = [\Delta x_t, \Delta y_t, \Delta z_t]^T$ 与 Δt 的关系为

$$\Delta_t = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{T_1}}{\partial t} \\ \frac{\partial y_{T_1}}{\partial t} \\ \frac{\partial z_{T_1}}{\partial t} \end{bmatrix} \Delta t = \begin{bmatrix} K_{p_x} - \frac{C_1 C_6 - C_2 C_4}{C_3 C_6 - C_4 C_5} \\ K_{p_y} - \frac{C_1 C_5 - C_2 C_3}{C_4 C_5 - C_3 C_6} \\ K_{p_z} + \frac{(p_x - x_T)M + (p_y - y_T)N}{p_z - z_T} \end{bmatrix} \Delta t \quad (9)$$

其中

$$C_1 = (K_{v_x} (x_T - p_x) + K_{v_y} (y_T - p_y) + K_{v_z} (z_T - p_z)) (p_z - z_T) \quad (10)$$

$$C_2 = ((1-f)^2 x_T K_{p_x} + (1-f)^2 y_T K_{p_y} + z_T K_{p_z}) (p_z - z_T) \quad (11)$$

$$C_3 = v_x (p_z - z_T) - v_z (p_x - x_T) \quad (12)$$

$$C_4 = v_y (p_z - z_T) - v_z (p_y - y_T) \quad (13)$$

$$C_5 = (1-f)^2 x_T (p_z - z_T) - z_T (p_x - x_T) \quad (14)$$

$$C_6 = (1-f)^2 y_T (p_z - z_T) - z_T (p_y - y_T) \quad (15)$$

其中 $\mathbf{K}_p(t) = (K_{p_x}, K_{p_y}, K_{p_z})$ 和 $\mathbf{K}_v(t) = (K_{v_x}, K_{v_y}, K_{v_z})$ 分别表示目标点 \mathbf{T}_1 对应方位时刻的卫星位置和速度变化率。

递推公式组 III: 假设待定位点 $\mathbf{T}_3 = (x_{T_3}, y_{T_3}, z_{T_3})$ 与参考点 \mathbf{T}_2 具有相同的斜距和方位时间, 高程相差 Δh , 将高程 h 作为变量, 对式(1)~式(3)求导, 然后对求导后的方程组进行求解, 得到 \mathbf{T}_3 和 \mathbf{T}_2 之间的位置增量 $\Delta_h = [\Delta x_h, \Delta y_h, \Delta z_h]^T$ 与 Δh 的关系为

$$\Delta_h = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{T_2}}{\partial h} \\ \frac{\partial y_{T_2}}{\partial h} \\ \frac{\partial z_{T_2}}{\partial h} \end{bmatrix} \Delta h = \begin{bmatrix} \frac{(1-f)^2(R_e+h)}{(1-f)^2 x_{T_2} + (1-f)^2 y_{T_2} K'_{yx} + z_{T_2} K'_{zx}} \\ K'_{yx} \frac{\partial x_{T_2}}{\partial h} \\ K'_{zx} \frac{\partial x_{T_2}}{\partial h} \end{bmatrix} \Delta h \quad (16)$$

其中

$$K'_{yx} = \frac{v_z(x_{T_2} - p_x) - v_x(z_{T_2} - p_z)}{v_y(z_{T_2} - p_z) - v_z(y_{T_2} - p_y)} \quad (17)$$

$$K'_{zx} = \frac{v_y(x_{T_2} - p_x) - v_x(y_{T_2} - p_y)}{v_z(y_{T_2} - p_y) - v_y(z_{T_2} - p_z)} \quad (18)$$

根据递推公式组 I-III, 待定位点 T_3 和参考点 T 之间的 3 维位置增量可沿图 1 所示的路径计算, 输入参数包括: 参考点 T 的 3 维位置, 卫星的状态矢量, T_3 和 T 的斜距差, 方位时间差和高程差。因此待定位点 T_3 的 3 维位置可表示为

$$T_3 = T + \Delta_{R_s} + \Delta_t + \Delta_h \quad (19)$$

为降低运算复杂度, 仅用一阶导数来描述 3 轴位置增量与斜距差、方位时间差和高程差的关系, 因为星载 SAR 的斜距较大^[18], 在局部区域利用一阶导数表示的直线来近似斜距球、地球椭球及多普勒锥的曲线的精度已足够高, 因此, 仅用一阶导数描述是合理的。同样由于星载 SAR 的斜距较大, 点目标位置随斜距、方位时间和高程的变化率在局部区域内近似恒定, 待定位像素的 3 维位置可使用同一参考像素的递推系数来解算。

2.3 处理流程

本文定位方法的处理流程分为 4 步, 如图 2 所示。

(1)在 SAR 图像中选择 2 维格网, 获取格网像素的 3 维位置和高度^[11], 如图 3 所示, 输入参数包括外部 DEM, 卫星状态矢量, 格网像素在 SAR 图像中的坐标等。首先, 预设待定位像素高程 h_0 ; 然

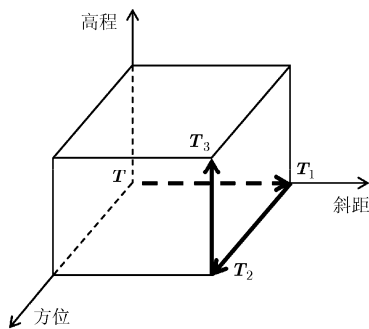


图 1 待定位点 3 维位置的计算路径

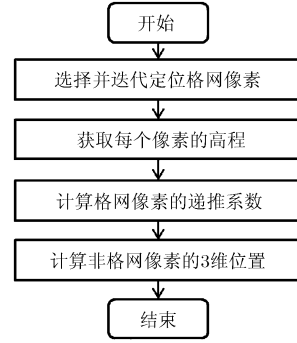


图 2 本文方法的处理流程

后迭代获取像素空间位置的数值解, 将像素的空间位置转换到 DEM 的坐标系下, 根据像素的经纬度内插 DEM, 得到像素的高程 h_1 ; 最后比较 h_0 和 h_1 , 若小于门限值, 则迭代结束, 若大于门限值, 则重复上述过程。

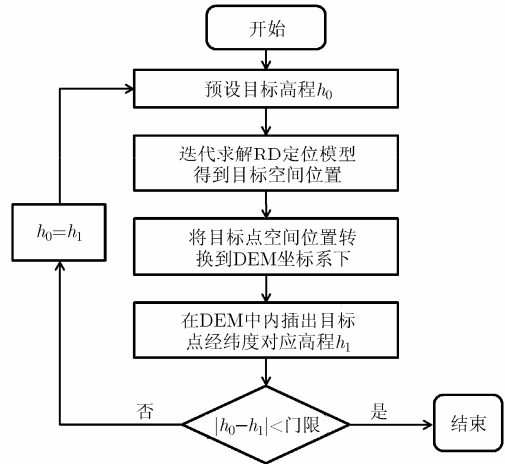


图 3 迭代方法获取目标点位置和高程的流程图

(2)利用格网像素高程得到非格网像素的高程。

(3)根据式(4)-式(18)计算每个格网像素的递推系数。

(4)利用最近格网像素的递推系数计算非格网像素的 3 维定位位置, 输入参数为待定位像素与参考格网像素之间的斜距差, 方位时间差和高程差。

对于上述处理流程, 如果定位前 SAR 图像像素高程已知, 则直接跳过步骤(2); 对于定位前 SAR 图像像素高程未知的情况, 需利用格网像素的高程得到每个像素的高程。根据式(19)可知, 像素的高程误差直接导致定位误差, 为降低非格网像素的高程误差, 这里给出一种非格网像素高程获取方法: 通过插值格网像素的经纬度得到非格网像素的经纬度, 然后在 DEM 中取出相应位置的高程。

3 实验结果

本节进行仿真实验来验证递推公式的有效性, 主要的系统参数取值见表 1, 卫星轨道参数分别来源于 TerraSAR-X 和 Radarsat-2 录取的 SAR 图像。

表1 主要系统参数

参数	采样频率 (MHz)	PRF(Hz)	场景近边斜距 (10^{-3} s)
参数1	109.88	3637.65	4.762216830
参数2	56.30	1600.22	6.563154014

在场景内选择7个目标点,目标点分布如图4所示。 T_0 至 T_6 沿正方体的对角线均匀分布, T_6 相对于 T_0 的坐标位置为(54,54,54),单位为m。为方便结果展示,这里将其它目标点相对于 T_0 的斜距和方位时间增量与相应的采样间隔相乘,由时间单位转化为长度单位。

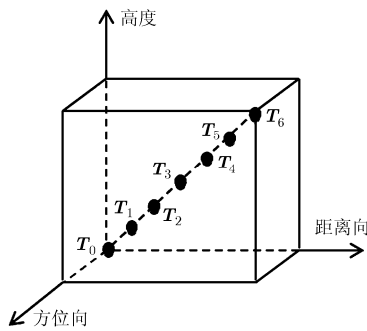
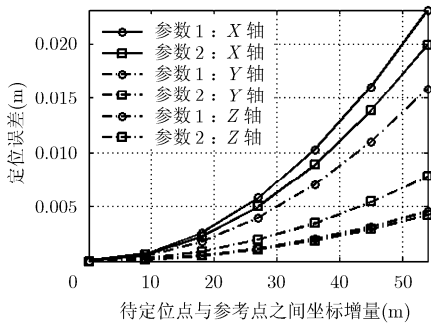
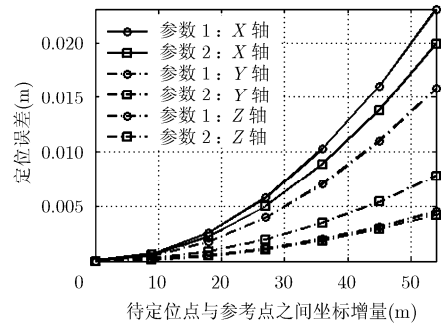


图4 场景待定位点分布



(a)成像多普勒中心0 Hz



(b)成像多普勒中心2000 Hz

图5 递推公式的精度验证

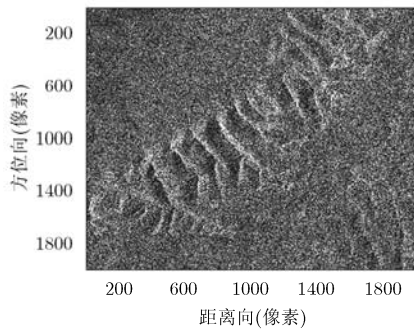
与迭代方法定位结果相比,成像多普勒中心为0 Hz和2000 Hz时,利用递推公式求解待定位点位置的误差分别如图5(a)~图5(b)所示。由图5知,本文算法在不同成像多普勒中心下的定位精度几乎相同,待定位点与参考点之间的坐标增量小于50 m时,3轴定位误差小于0.02 m。

本文采用 TerraSAR-X 于2008年3月10日录取的美国大峡谷区域的部分 SAR 图像验证本文算法的性能。

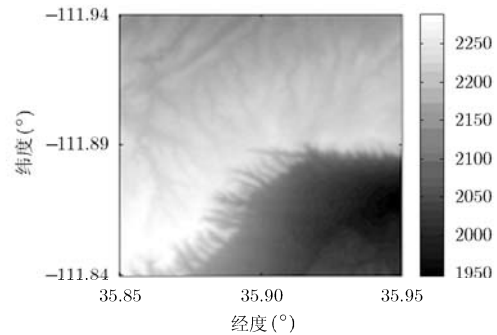
图6(a)为 TerraSAR-X 录取的 SAR 图像,图6(b)为定位输入对应区域的 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)DEM。选择格网像素间距为30像素,将迭代方法^[1]获取的非格网像素的高程作为真值,通过插值得到非格网像素的经纬度,然后在 DEM 中取出相应高程的精度如表2和图7(a)所示。

表2 本文非格网像素高程获取精度(m)

误差绝对 值均值	误差绝对 值标准差	最大正误差	最大负误差
0.0409541	0.1238909	5.432824	-4.096036



(a) TerraSAR-X录取的SAR图像



(b) SRTM DEM

图6 算法验证所用美国大峡谷区域实测数据

假设格网像素的方位向和距离向间距分别为 M_a 和 M_r ，则在 $M_a \times M_r$ 的数据块内，本文方法和文献[2]中多项式方法的运算量由式(20)–式(23)给出。这里假设：多项式方法的拟合阶数为 2，插值方法为双线性插值，当格网间距较大时，格网像素的比例很小，因此格网像素的系数拟合等运算量可忽略。

$$M_R = 3M_aM_r + M_a + M_r \quad (20)$$

$$A_R = 9M_aM_r \quad (21)$$

$$M_P = 36M_aM_r + M_aM_r + 6M_aM_r \quad (22)$$

$$A_P = 27M_aM_r + 6M_aM_r \quad (23)$$

式(20)中， M_R 为本文方法所需乘法次数，第 1 项为计算 Δ_h 所需乘法次数，第 2 项和第 3 项分别为计算 Δ_t 和 Δ_{R_s} 所需乘法次数。式(21)中， A_R 为本文方法所需加法次数，用于计算式(19)所示的位置增量与参考像素位置的叠加。式(22)中， M_P 表示多项式方法所需乘法次数，第 1 项为插值获取多项式系数所需乘法次数，第 2 项为计算待定位像素高程平方所需乘法次数，第 3 项为将高程代入拟合多项式所需乘法次数。式(23)中， A_P 为多项式方法所需加法次数，第 1 项为插值获取多项式系数所需加法次数，第 2 项为将高程代入拟合多项式所需加法次数。此外，使用最临近插值时，多项式方法精度虽有所降低，但仍具有很高的定位精度，需要的加法和乘法

次数分别为 $9M_aM_r$ 和 $8M_aM_r$ 。

距离向和方位向格网间距都为 30 像素时，本文方法的定位误差如图 7(b)–图 7(d)所示。算法实现语言为 C++，基本运行环境为：Intel i3 处理器，2.0 GB 内存，本文方法和多项式方法的差异部分运行时间分别为 0.078 s 和 1.547 s，可以看出，本文方法较多项式方法的运行时间大幅降低。

图 7 所示的定位误差中，既包括了利用递推公式或多项式拟合解算目标位置引入的误差，也包括图 7(a)所示的待定位像素高程误差引入的定位误差。可以看出，在不包含待定位像素高程误差引入的定位误差，且格网像素间隔小于 50 m 时，本文算法的定位误差小于 0.02 m，与仿真实验结果一致；包含像素高程误差引入的定位误差时，定位误差小于 0.1 m。

4 结论

本文提出了一种基于递推公式的 SAR 高效正向定位算法。该算法利用 3 组递推公式计算待定位像素与参考像素之间的 3 轴位置增量，然后将计算出的位置增量与参考点的位置相加求得待定位点的 3 维位置，避免了 3 维格网建立、系数拟合和插值操作。仿真和实测数据的处理结果表明，本文算法具有较高的精度和较低的运算复杂度。

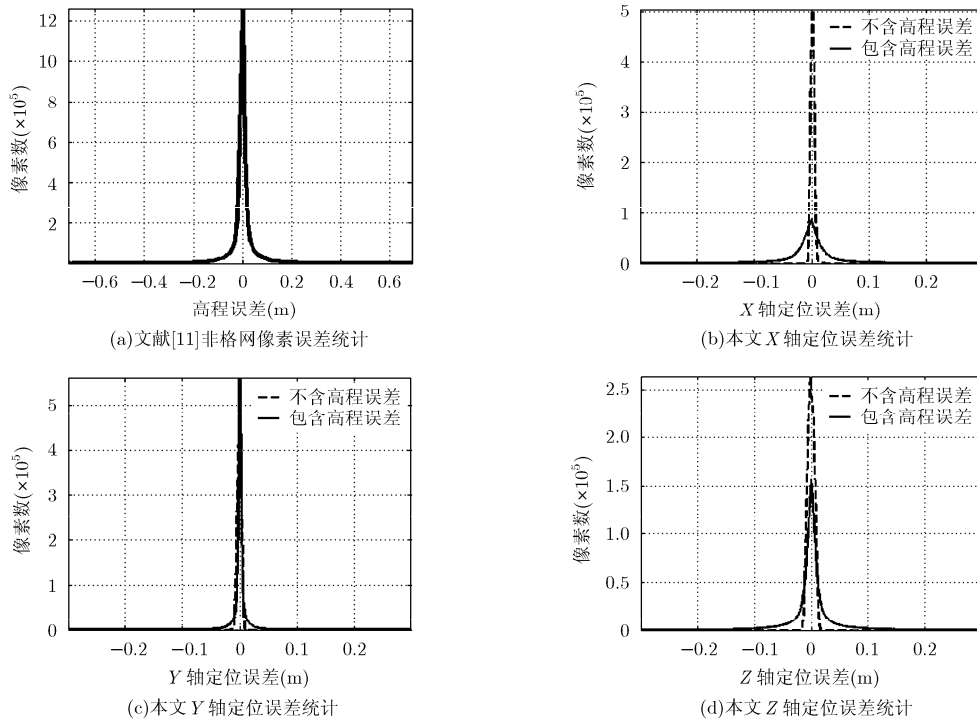


图 7 文献[11]方法和本文方法的定位精度

参考文献

- [1] Curlander J C. Location of spaceborne SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1982, 20(3): 359-364.
- [2] 王青松, 黄海风, 董臻, 等. 星载合成孔径雷达高精度快速定位方法[J]. *科学通报*, 2011, 56(11): 2609-2615.
Wang Qing-song, Huang Hai-feng, Dong Zhen, *et al.* High-precision, fast geolocation method for spaceborne synthetic aperture radar[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(11): 2609-2615.
- [3] Tao C V and Hu Y. A comprehensive study of the rational functional model for photogrammetric processing[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(12): 1347-1357.
- [4] Frey O, Santoro M, Werner C L, *et al.* DEM-based SAR pixel-area estimation for enhanced geocoding refinement for enhanced geocoding refinement and radiometric normalization[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(1): 48-52.
- [5] Pedlar D N and Coe D J. Target geolocation using SAR[J]. *IEE Proceeding-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(1): 35-42.
- [6] 史绪国, 张路, Balz T, 等. 一种用于SAR影像地理编码的改进的三维格网插值方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37(11): 1325-1331.
Shi Xu-guo, Zhang Lu, Balz T, *et al.* A modified 3D grid interpolation method for satellite SAR geocoding[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(11): 1325-1331.
- [7] 尹建凤, 李道京, 吴一戎. 顺轨三频三孔径星载SAR的运动目标检测及定位方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(4): 902-907.
Yin Jian-feng, Li Dao-jing, and Wu Yi-rong. Research on the method of moving target detection and location with three-frequency three-aperture along-track spaceborne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(4): 902-907.
- [8] 燕英, 周荫清, 李春升, 等. 弹载合成孔径雷达成像处理及定位误差分析[J]. *电子与信息学报*, 2002, 24(12): 1932-1938.
Yan Ying, Zhou Yin-qing, Li Chun-sheng, *et al.* Missile-borne SAR imaging and error analysis of positioning[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(12): 1932-1938.
- [9] Sansosti E, Berardino P, Manunta M, *et al.* Geometrical SAR image registration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2861-2870.
- [10] Nitti D O, Hanssen R F, Refice A, *et al.* Impact of DEM-assisted coregistration on high resolution SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(3): 1127-1143.
- [11] Eineder M. Efficient simulation of SAR interferograms of large areas and of rugged terrain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1415-1427.
- [12] 郭交, 李真芳, 刘艳阳, 等. 基于粗数字高程模型信息的干涉相位图生成方法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(11): 2642-2647.
Guo Jiao, Li Zhen-feng, Liu Yan-yang, *et al.* Approaches to interferogram generation based on coarse DEM[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(11): 2642-2647.
- [13] Walter D and Busch W. Influences of DEM quality parameters on the topographic phase correction in DInSAR [C]. *International Geoscience & Remote Sensing Symposium 2012*, Munich, Germany, July. 22-27, 2012: 3927-3930.
- [14] Delft Institute of Earth Observation and Space Systems (DEOS), Delft object-oriented radar interferometric software user's manual and technical documentation, Version v4.02, TUDelft Netherlands, 2008: 22-24.
- [15] Prats P, Macedo A C, Reigber A, *et al.* Comparison of topography-and aperture dependent motion compensation algorithms for airborne SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 349-353.
- [16] Lachaise M, Balss U, Fritz T, *et al.* The dual-baseline interferometric processing chain for the TanDEM-X mission[C]. *International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, Munich, Germany, July. 22-27, 2012: 5562-5565.
- [17] Lachaise M, Fritz T, Balss U, *et al.* Phase unwrapping correction with dual-baseline data for the TanDEM-X mission[C]. *International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, Munich, Germany, July. 22-27, 2012: 5566-5569.
- [18] Cumming I G and Wong F H. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*[M]. Norwood, USA, Artech House, 2005: 113-168.
- 李锦伟: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为星载合成孔径雷达系统设计与数据处理.
- 李真芳: 男, 1977年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达干涉系统设计.
- 侯英龙: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为机载合成孔径雷达运动补偿和干涉处理.