科学通报 2011 年 第 56 卷 第 31 期：2609 ~ 2615
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

星载合成孔径雷达高精度快速定位方法

王青松, 黄海风, 董臻, 余安喜, 何峰, 梁甸农

国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073
E-mail: yilingsql@126.com

2011-05-11 收稿, 2011-08-29 接受
十二五高分专项(A0103/1112JC)和国家自然科学基金(61002031, 60902092)资助项目

摘要 星载合成孔径雷达(SAR)定位是其影像应用的基础, 研究高效能的定位方法对促进SAR影像应用具有重要意义. 从SAR成像机理出发, 分析揭示了SAR成像几何的两个基本特性, 并对两个特性的合理性进行了论证. 基于此, 提出了一种高精度快速定位解算方法. 针对目前国际上最为典型的四种 SAR 卫星, 德国 TerraSAR-X、意大利 COSMO-SkyMed、日本 ALOS-PalSAR 和加拿大 Radarsat-2 进行了精度分析, 结果表明本文方法的精度完全能够满足这四种卫星的实际需求. 最后, 利用 TerraSAR-X 聚束模式 SAR 实测数据进行快速定位处理, 性能评估结果表明在极大降低运算量的情况下保持了极高的定位精度, 验证了方法的高效性和正确性.

关键词
星载合成孔径雷达定位
距离-多普勒模型
地理编码
几何校正

随着星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术的发展, SAR 影像数据在军事侦查及国民建设中发挥着越来越重要的作用[1~3]. 然而, 由于侧视及地形变化对 SAR 成像几何的影响, 使得 SAR 影像与光学图像相比存在更大的几何变形. 因此, SAR 影像在应用前需要做几何校正或地理编码, 这些处理都是以 SAR 高精度定位为基础的.

目前, 星载 SAR 定位采用最为广泛的模型是由 Brown[4]和 Curlander[5]提出的距离-多普勒(Range Doppler, RD)模型. 国内外研究学者围绕该模型展开了大量研究, 包括模型参数提取与优化、坐标转换、模型求解、定位误差源分析等. RD 定位模型所采用的三个方程分别是距离方程、多普勒方程和地球模型方程. 在这三个方程的约束下, 目标位置的精确求解只能采取繁杂的迭代方法. Li 等人[6]最早提出了假定地球是一个具有星下点本地半径的球体, 则能用解析方法求得目标相对于星下点的位置, 袁孝康[3,7]对这一近似情况下的定位解析解进行了系统的研究. 国内外一些其他学者[8~12]研究了 RD 定位模型在各种近似情况下的解算方法. 美国喷气推进实验室、德国宇航中心和意大利空间局等国际科研机构都基于 RD 模型开发了相应的 SAR 影像定位处理模块.

在早期卫星轨道测量精度较低的情况下, 各种近似假设所引起的定位精度损失在近地遥感任务中是可以接受的. 然而, 随着星载雷达测量技术的发展, 尤其是轨道测量精度的提高, SAR 定位已经达到米级精度甚至优于 1 m, 传统近似方法所引起的定位误差已经与定位精度相比拟. 以德国 TerraSAR-X 卫星为例, 其事后科学轨道测量精度为 3 cm[13], SAR 影像产品的定位精度优于 10 m, 在某些工作模式下甚至可以达到亚米级定位精度[14,15]. 此时, 基于某些近似假设的快速定位方法所引起的定位精度损失不能再被忽略. 另外, 定位算法的不严密性, 不但会影响定位产品的精度, 更为重要的是可能会影响其他问题研究结论的正确性, 如定位中大气延迟的影响分析等. 最近在宇宙天文中就有一个非常重要的例子, 由于 WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)中使用的算法有问题[16], 导致了宇宙背景辐射的较大四极矩的假象[17]. 由此可见, 研究新的高精度快速定位解算方法, 无论是从提高 SAR 影像产品的定位精

英文版见: Wang Q S, Huang H F, Dong Z, et al. High-precision, fast geolocation method for spaceborne synthetic aperture radar. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4779-2

度来说, 还是从促进其他问题的研究来考虑, 都具有十分重要的意义.

在分析揭示 RD 定位模型基本特性基础上, 本文提出了一种星载 SAR 高精度快速定位方法. 该方法不但解决了星载 SAR 定位迭代运算量非常大的问题, 极大地提高了运算速度, 而且与精确迭代求解方法相比, 其定位精度损失仅 10^{-4} m 级, 可以忽略不计. 文章最后针对 TerraSAR-X 聚束模式实测数据的处理结果验证了方法的有效性.

1 高精度快速 SAR 定位方法

1.1 RD 定位模型及特性分析

星载 SAR 定位是基于成像处理得到的 SAR 影像信息及雷达卫星轨道数据, 结合距离方程、多普勒方程和地球模型方程来联立求解图像像元对应地面目标点的三维坐标. 在地固坐标系下, 根据星载 SAR 系统几何模型可以列出距离方程为

$$R=\left|P_S-P_T\right|, \tag{1}$$

多普勒方程为

$$f_{DC}=-2\frac{\left(V_S-V_T\right)\left(P_S-P_T\right)}{\lambda\left|P_S-P_T\right|}, \tag{2}$$

地球模型方程为

$$\frac{x_T^2+y_T^2}{\left(R_e+h\right)^2}+\frac{z_T^2}{R_p^{\,2}}=1, \tag{3}$$

式中, R 对应于 SAR 影像斜距, P_S, V_S 分别对应于 SAR 天线相位中心位置、速度矢量. $P_T=(x_T, y_T, z_T)$, V_T 分别对应地面目标点的位置、速度矢量, 在地固坐标系下 V_T 等于 0 矢量. λ 为雷达发射电磁波的波长, f_{DC} 对应于 SAR 影像成像时多普勒中心频率. R_e 和 R_p 分别为地球的赤道半径和极地半径, h 是目标相对于假设地球模型的高度. 需要说明的是, 地球模型的有效性会影响 SAR 定位精度, 一些学者[18]对式(3)的地球模型进行了修正. 在此采用的是大多文献普遍使用的地球模型, 本文方法同样适用于其他地球模型.

由于式(1)~(3)中含有非线性方程, 利用其求解目标位置时需要采用迭代的方法. 星载 SAR 系统的一个重要任务是进行全球观测, 获取全球海量 SAR 影像产品, 常规逐点迭代运算方式很难满足实际海量数据处理的需求, 国内外学者都致力于研究 SAR 定位的快速解算方法.

SAR 影像几何变形的主要原因是雷达侧视成像和地形高程变化. 分析发现, 星载 SAR 成像的空间几何模型(如图 1 所示)决定了 SAR 成像的两个基本特性: ① 在一定大小的邻域内, SAR 成像几何变化很小且具有连续性, 即图 1 中 M 点的成像几何与周围四点(M_i, i = 1, 2, 3, 4)的几何关系相比变化很小. 在星载 SAR 成像处理中, 需要根据 SAR 成像几何来确定二维匹配滤波器参数, 该滤波器具有空变性, 在当前典型星载 SAR 分辨能力下, 沿方位向数十至数百公里范围内可忽略其空变性, 沿距离向通常在数十到数百米的聚集深度内也可忽略, 匹配滤波器参数沿两维的空变曲线也是平缓的, 可由低阶曲线来拟合. 以上特性作为建立频域快速成像算法的基本前提条件已得到充分验证. 由于二维匹配滤波器的空变性是成像几何空变性的直接反映, 这也充分说明了 SAR 空间几何缓变特性的合理性. ② 在式(1)~(3)的约束下, M 点的高程 h 与其求解得到的三维坐标(x,y,z)之间的关系可以分别通过三个多项式 $p_x(h)$, $p_y(h)$和 $p_z(h)$来进行描述. 下面我们对这一条特性的成立进行论证.

不妨假设用二阶多项式 $p_x(h)$, $p_y(h)$和 $p_z(h)$来近似目标点三维坐标(x,y,z)与其高程 h 之间的变化关系. 由泰勒展开余项定理可知, 函数 $f(h)$在包含已知点 h_i $i=\{0,1,2\}$的区间$[h_a,h_b]$内用 2 阶多项式 $p(h)$近似时, 存在$\xi\in(h_a,h_b)$使得在点 $h\in[h_a,h_b]$处的近似误差为

$$E\left(f(h);h\right)=f(h)-p(h)=\frac{\omega(h)}{(2+1)!}f^{2+1}(\xi), \tag{4}$$

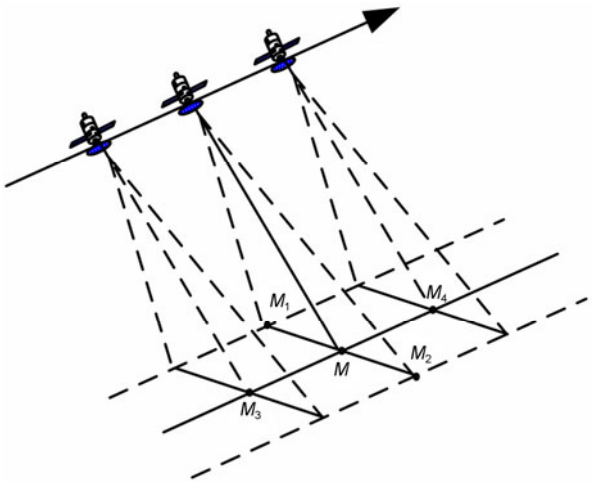

图 1 SAR 卫星成像几何示意图

其中 $\omega(h) = (h-h_0)(h-h_1)(h-h_2)$. 参考笔者在文献[19]中的类似方法, 可以分析得到针对 SAR 成像几何, 利用多项式进行近似的精度损失. 限于篇幅原因, 此处只给出精度分析结果.

将目前国际上最为典型的 4 种 SAR 卫星, 德国 TerraSAR-X、意大利 COSMO-SkyMed、日本 ALOS-PalSAR 和加拿大 Radarsat-2 的系统参数分别代入误差模型, 得到二阶多项式的精度损失如图 2 所示.

图 2 横坐标对应实际的地球高程变化范围(0~9000 m), 纵坐标对应各 SAR 卫星系统观测下视角的工作范围. 由图可见, 针对目前国际上这四种 SAR 卫星, 二阶多项式所导致的定位精度损失在 10^{-4} m 以上量级, 完全能够满足实际定位需求. 综上分析结果, SAR 成像几何两个基本特性的正确性得到了验证, 并且二阶多项式就能获得足够高的定位精度.

1.2 高精度快速定位方法的实现

在 1.1 节中我们介绍了 RD 定位模型的基本原理, 分析论证了 SAR 成像几何的两个基本特性. 基于此, 提出了一种高精度快速定位解算方法. 下面给出方法的详细实现步骤:

第一步: 衍生地球模型.

假定 n 个高程(h_i, i=1,2,⋯n)分别代入地球模型, 衍生出下述 n 个地球模型方程:

$$\frac{x_T^2+y_T^2}{\left(R_e+h_i\right)^2}+\frac{z_T^2}{R_p{}^2}=1,\quad i=1,2,\cdots n, \tag{5}$$

n 取大于待拟多项式阶数的数值. h_i 均匀分布于 SAR 图像观测区域的高程变化范围, 在未知观测区域高程变化范围的情况下, h_i 可取均匀分布于实际地球高程变化范围(0~9000 m). 以二阶多项式为例, 可取 n=3, h_1=0 m, h_2=4500 m, h_3=9000 m.

第二步: SAR 图像粗采样及定位处理.

对原始 SAR 图像按照一定的方位向和距离向间隔(分别为 k, l)进行粗采样, 得到粗采样后 SAR 图像. 对粗采样后 SAR 图像, 结合相应的距离方程、多普勒方程和衍生得到的每一个地球模型方程, 分别进行定位处理, 定位解算采用迭代的方法. 由此可以得到粗采样后 SAR 图像在 n 个地球模型方程各自约束下的 n 组定位结果 P_{Ti}=(x_{Ti}, y_{Ti}, z_{Ti}) i=1,2,⋯n.

第三步: 多项式拟合与内插.

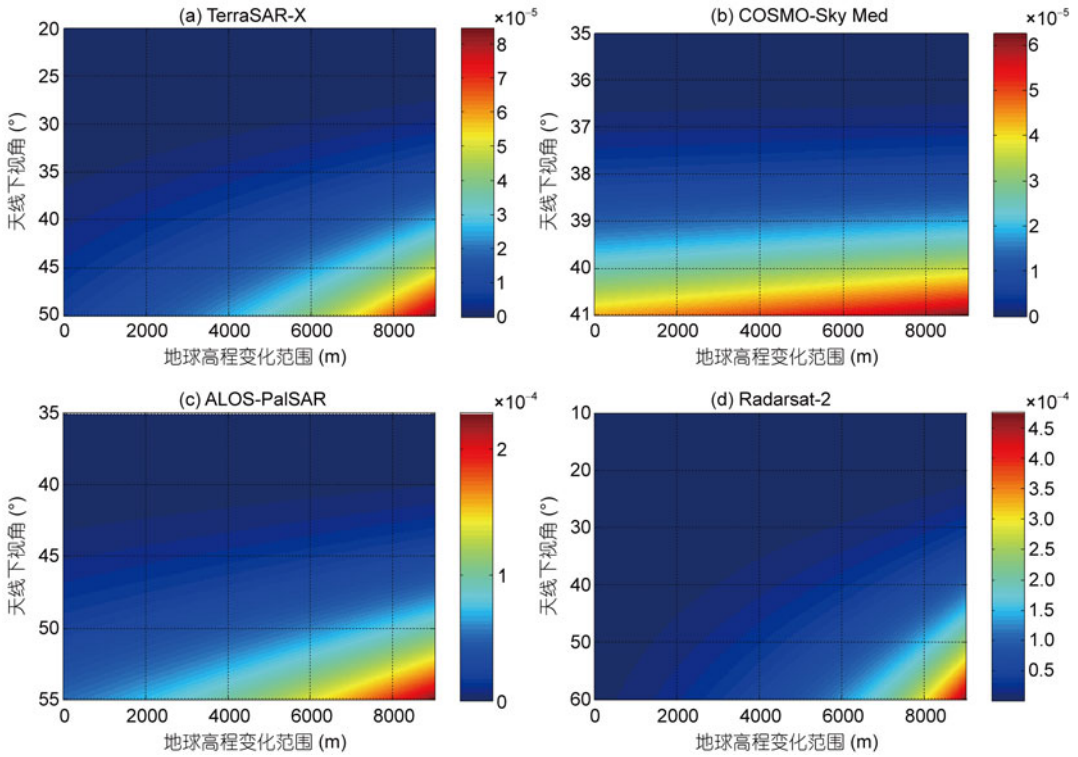

图 2 4 种典型 SAR 卫星的精度损失分布图

基于第二步得到的 n 组定位结果 $P_{Ti}=(x_{Ti}, y_{Ti}, z_{Ti})$, i=1,2,…n, 及其对应的地球模型高程 h_i, i=1,2,…n, 在粗采样后 SAR 图像每一像素位置(a_s, r_s)处分别拟合出三个以高程 h 为自变量的 $m(m<n)$阶多项式 $p_{x_T(a_s,\ r_s)}(h)$, $p_{y_T(a_s,\ r_s)}(h)$和 $p_{z_T(a_s,\ r_s)}(h)$. 三个多项式各自独立地描述了在像素(a_s, r_s)处定位解算结果 $x_T(a_s, r_s)$, $y_T(a_s, r_s)$和 $z_T(a_s, r_s)$与高程 h 的变化关系. 然后, 对粗采样后 SAR 图像像素位置的多项式进行双线性内插可以求得原始 SAR 图像每一像素位置(a, r)处的多项式 $p'_{x_T(a,\ r)}(h)$, $p'_{y_T(a,\ r)}(h)$和 $p'_{z_T(a,\ r)}(h)$如下所示:

$$p'_{x_T(a,r)}(h)=\mathrm{bilinear}\left(\begin{bmatrix} p_{I_1(x)}(h) & p_{I_2(x)}(h) \\ p_{I_3(x)}(h) & p_{I_4(x)}(h) \end{bmatrix}\right), \quad (6)$$

$$p'_{y_T(a,r)}(h)=\mathrm{bilinear}\left(\begin{bmatrix} p_{I_1(y)}(h) & p_{I_2(y)}(h) \\ p_{I_3(y)}(h) & p_{I_4(y)}(h) \end{bmatrix}\right), \quad (7)$$

$$p'_{z_T(a,r)}(h)=\mathrm{bilinear}\left(\begin{bmatrix} p_{I_1(z)}(h) & p_{I_2(z)}(h) \\ p_{I_3(z)}(h) & p_{I_4(z)}(h) \end{bmatrix}\right), \quad (8)$$

其中 $I_i(c)$, i=1,2,3,4 为如下坐标函数:

$$I_1(c)=c_T\left(\mathrm{floor}\left(\frac{a}{k}\right),\mathrm{floor}\left(\frac{r}{l}\right)\right), \quad (9)$$

$$I_2(c)=c_T\left(\mathrm{floor}\left(\frac{a}{k}\right),\mathrm{floor}\left(\frac{r}{l}\right)+1\right), \quad (10)$$

$$I_3(c)=c_T\left(\mathrm{floor}\left(\frac{a}{k}\right)+1,\mathrm{floor}\left(\frac{r}{l}\right)\right), \quad (11)$$

$$I_4(c)=c_T\left(\mathrm{floor}\left(\frac{a}{k}\right)+1,\mathrm{floor}\left(\frac{r}{l}\right)+1\right), \quad (12)$$

bilinear()表示双线性内插操作, floor()表示向小取整操作.

第四步: 原始 SAR 图像定位解算.

将实际地球模型高程 h_e 分别代入多项式 $p'_{x_T(a,\ r)}(h)$, $p'_{y_T(a,\ r)}(h)$和 $p'_{z_T(a,\ r)}(h)$中, 即可解算得到原始 SAR 图像每一像素的定位结果 $P_T(a, r)$.

由此可见, 上述定位解算只需在粗采样后 SAR 图像像素处采用迭代的方法, 对于其他像素直接进行多项式计算即可求得其相应的定位结果. 这一过程利用多项式近似极大地减少了重复迭代求解的次数, 缩减了运算量. 下面我们从计算复杂度来证明本文方法的高效性, 计算复杂度是比较不同算法效率的一项重要指标. 复杂度最精确的表述方式应该是给出算法采用的加法与乘法各自的次数, 但是面对复杂的复合型的算法时, 精确统计加法与乘法运算次数就变得较为困难, 此时一般用渐进复杂度(大 O)来表述算法的复杂程度. 由于本文方法是一种复合算法, 涉及迭代求解非线性方程组、多项式拟合和多项式内插等数学计算操作. 因此, 进行复杂度比较时我们采用渐进复杂度这一指标. 在迭代求解非线性方程组(1)~(3)时, 可将当前像素的求解结果作为下一像素的迭代初始值, 这样平均每一像素求解的迭代次数约为 5 次. 依据文献[20], 传统逐点迭代求解方法的计算复杂度为 $5MNO(3^2)$, 其中 M, N 对应 SAR 图像的行、列数目. 本文方法的计算复杂度为

$$T=5n\frac{MN}{kl}\mathrm{O}\left(3^2\right)+3\frac{MN}{kl}\mathrm{O}(mn)+3M\mathrm{O}\left(\log(N)\right)+3N\mathrm{O}\left(\log(M)\right), \quad (13)$$

其中 n 为高程数量, m 为待拟多项式的阶数, k, l 分别为方位向和距离向粗采样间隔. 以第 2 节所采用的实测数据为例, 当 M = 6207, N = 10912, m = 2, n = 3 时, 只需方位向和距离向粗采样间隔的乘积 kl > 3.4 即可满足本文方法的计算复杂度小于传统逐点迭代求解方法. 至此, 从计算复杂度方面再一次论证了本文方法的高效性.

2 实测数据处理与分析

本节所用实测数据是德国 TerraSAR-X 卫星于 2009 年 2 月 23 日在聚束工作模式下获取的. 数据大小为 6207 像素×10912 像素, 中心位于纬度–25.34°经度 131.02°, 方位分辨率为 1.1 m, 距离分辨率为 0.6 m. 对应的观测区域为澳大利亚著名景点“艾尔斯巨石(Ayers Rock)”, 艾尔斯岩高 348 m, 基围周长约 8.5 km, 是世界最大的整体岩石. 利用本文方法对该实测数据进行定位处理, 结果如图 3 所示.

由图 3 可以看到, SAR 定位后影像与 Google Earth 影像中的道路等纹理信息吻合很好. 图 4 给出了图 3(a)中沿距离向(红色虚线)和方位向(蓝色虚线)各取一条数据线所对应的二阶多项式各阶系数变化曲线.

由图 4 可以看出, 多项式的各阶系数在方位向和距离向均近似呈现为线性变化, 这种规律再一次验证了 SAR 成像几何的第一条特性. SAR 产品的定位误差可以分为两部分: 一是各类误差源(轨道测量误差、大气延迟误差等)所引起的定位误差; 二是定位模型解算时近似所导致的定位误差. 本文提出了一

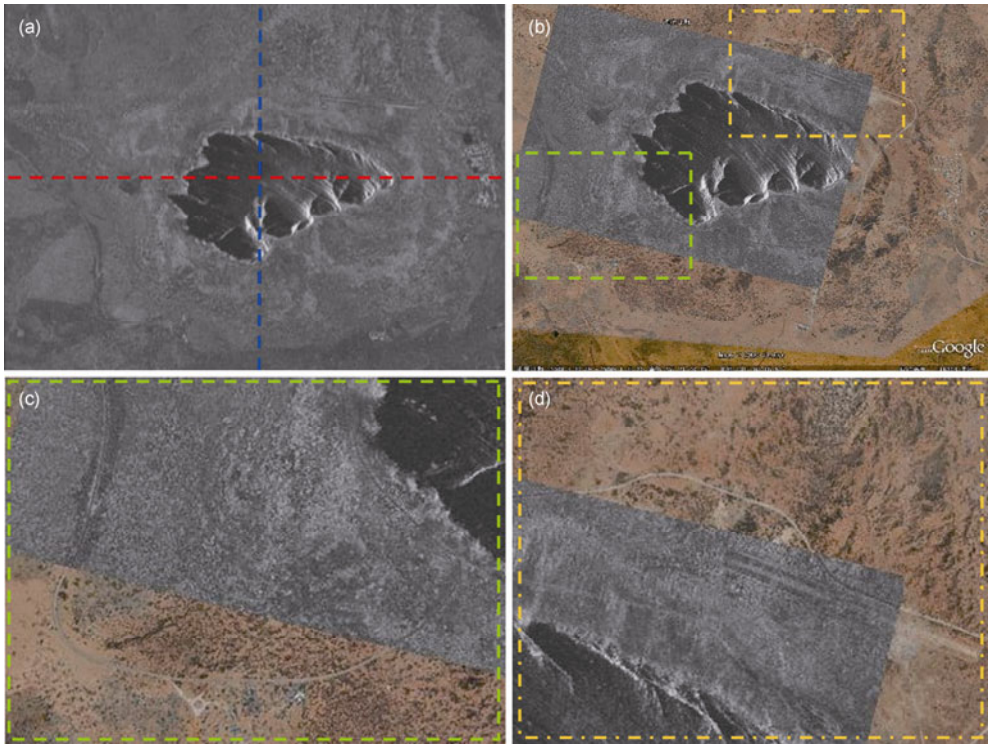

图 3　TerraSAR-X 实测数据定位结果

(a) TerraSAR-X 聚束模式 SAR 幅度图，红、蓝色虚线分别对应图 4 中的距离向、方位向剖面, (b) SAR 图像定位后与 Google Earth 影像镶嵌结果, (c),(d) 分别为图(b)中相应区域的局部放大图

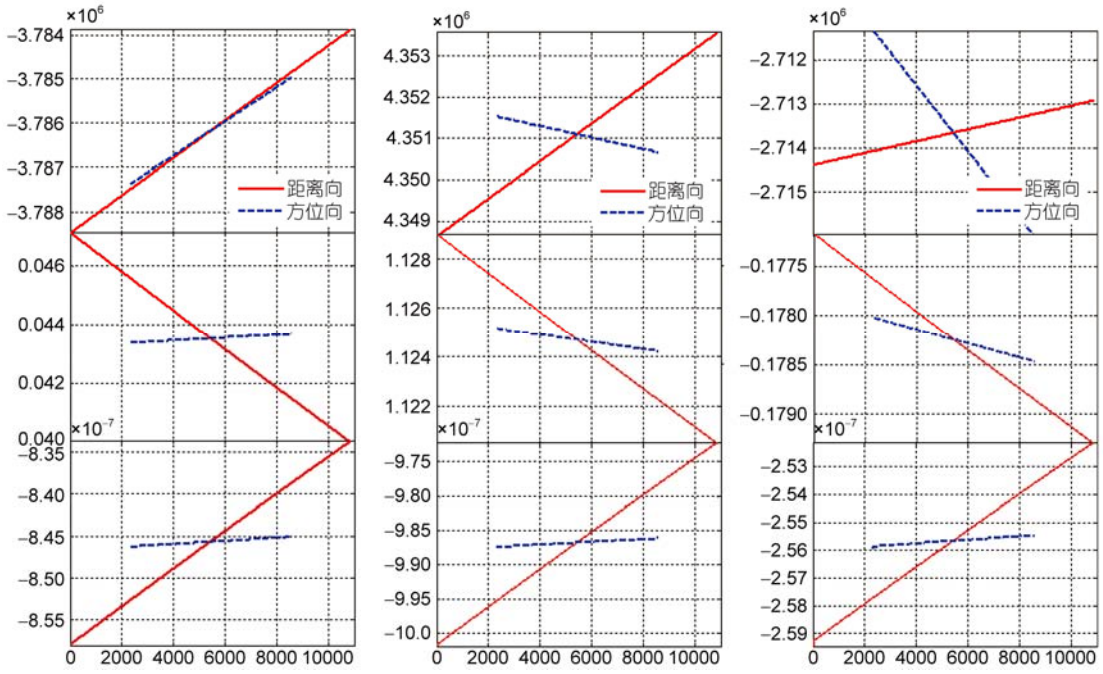

图 4　二阶多项式各阶系数曲线

第一列为 *X* 坐标多项式的各阶系数，第二列为 *Y* 坐标多项式的各阶系数，第三列为 *Z* 坐标多项式的各阶系数

表 1 SAR 定位方法处理性能

		处理时间(s)	X 坐标误差(m)	Y 坐标误差(m)	Z 坐标误差(m)
迭代求解方法		3778	0	0	0
本文方法 粗采样间隔 (像素)	10×10	181	0.0001525	0.0000836	0.0002733
	20×20	92	0.0001504	0.0000845	0.0002686
	30×30	57	0.0001601	0.0000970	0.0002808
	50×50	55	0.0001658	0.0001305	0.0002841
	100×100	56	0.0002383	0.0003991	0.0002743

种新的定位解算方法, 在各类误差源相等的情况下, 需要评估该方法所引起的定位误差. 我们以逐点迭代定位解算结果为参考评估本文方法的性能(实验 PC 环境为 Inter Core2 Quad CPU 2.33 GHz, 内存 2 GB, 程序语言为 IDL).

表 1 给出了逐点迭代求解方法的处理时间, 同时还给出了本文方法在不同参数下的处理性能, 采用均方根值作为各向坐标误差的度量. 由此可见, 随着采样间隔的增大, 本文方法在极大降低运算量的情况下保持了极高的精度. 但是, 当粗采样间隔大于 30 像素×30 像素时, 运行时间基本趋于稳定. 这是由于定位解算时间主要由两部分组成, 迭代运算时间和多项式插值时间, 而聚束模式 SAR 影像的像素数目相对较少, 随着粗采样间隔的增大, 多项式插值时间在总耗时中所占的比重越来越大, 逐步趋向恒值. 我们在处理更大幅的实测 TerraSAR-X 条带模式(32000 像素×15000 像素)数据时, 采样间隔取 100 像素×100 像素, 处理速度提升了约 200 倍, 定位精度损失却在 10^{-4} m 量级. 因此, 在工程应用时, 选取适当的算法参数, 可以获得最优的效率与精度折中. 值得指出的是, 本文方法稍加变换同样可应用于 SAR 影像的地理编码, 包括椭球表面校正地理编码(Geocoded Ellipsoid Corrected)和地形校正地理编码(Geocoded Terrain Corrected). 综上所述, 本文方法在效率与精度的综合性能方面具有明显的优势, 在 SAR 全球观测海量数据处理中可发挥重要作用.

3 结论

星载合成孔径雷达数据的高精度定位是其应用的一个前提, 面对全球观测的海量实测数据, 在保持定位精度的情况下, 如何提高数据处理速度是必须考虑的重要问题. 现有的高效率定位算法存在精度不高, 难以满足日益增长的定位精度需求的缺陷. 本文在分析论证 SAR 成像几何两个基本特性的基础上, 提出了一种高精度快速 SAR 定位解算方法. 针对 2009 年 2 月 23 日 TerraSAR-X 获取的聚束模式 SAR 数据, 用本文方法进行处理, 性能评估结果表明了方法的有效性, 在极大降低运算量的情况下保持了极高的精度, 为未来实现全球高精度 SAR 影像产品的快速批量化生产奠定了工程基础.

参考文献

1 Curlander J C, Mcdonough R N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. New York: Wiley, 1991
2 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001
3 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论. 北京: 国防工业出版社, 2003
4 Brown W E. Applications of SEASAT SAR digitally correlated imagery for sea ice dynamics. In: Amer Geophys Union Spring Meeting. Baltimore: IEEE, 1981. 25–29
5 Curlander J C. Location of spaceborne SAR imagery. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1982, 20: 359–364
6 Li F K, Johoson W T. Ambiguities in spaceborne synthetic aperture radar systems. IEEE Trans Aero Elect Sys, 1983, 19: 389–396
7 袁孝康. 星载合成孔径雷达的目标定位方法. 上海航天, 1997, 14: 51–57
8 Roth A, Kosmann D, Matschke M, et al. Experiences in multi-sensoral SAR geocoding. In: the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Lincoln: IEEE, 1996. 27–31
9 Liu X K, Ma H, Sun W. Study on the geolocation algorithm of space-borne SAR image. In: Advances in Machine Vision, Image Processing, and Pattern Analysis. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 270–280

10 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. 遥感学报, 2001, 5: 191–197
11 张永红, 林宗坚, 张继贤, 等. SAR 影像几何校正. 测绘学报, 2002, 31: 134–138
12 陈尔学, 李增元. 分析法和数值解算法相结合的星载 SAR 直接定位算法. 中国图象图形学报, 2006, 11: 1105–1109
13 Yoon Y T, Eineder M, Yague-Martinez N, et al. TerraSAR-X precise trajectory estimation and quality assessment. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2009, 47: 1859–1868
14 Schubert A, Jehle M, Small D, et al. Influence of atmospheric path delay on the absolute geolocation accuracy of TerraSAR-X high-resolution products. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2010, 48: 751–758
15 Weydahl D J, Eldhuset K. Geolocation accuracy of TSX spotlight image data. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 544–547
16 Liu H, Li T P. Inconsistency between WMAP data and released map. Chinese Sci Bull, 2010, 55: 907–909
17 Liu H, Li T P. Pseudo-dipole signal removal from WMAP data. Chinese Sci Bull, 2011, 56: 29–33
18 傅文学, 郭小方, 田庆久. 星载 SAR 距离-多普勒定位算法中地球模型的修正. 测绘学报, 2008, 37: 59–63
19 Wang Q S, Huang H F, Dong Z, et al. High-precision, fast DEM reconstruction method for spaceborne InSAR. Sci China Inf Sci, 2011, 54: 1–11
20 William H P, Saul A T, William T V, et al. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing (Second Edition). London: Cambridge University Press, 1992