论 文

一种星载 InSAR 高精度快速 DEM 重建方法

王青松*, 黄海风, 董臻, 余安喜, 梁旬农

国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073

* 通信作者. E-mail: yilingsql@126.com

收稿日期: 2010-05-06; 接受日期: 2010-12-16

国家自然科学基金 (批准号: 61002031) 资助项目

摘要 面对全球干涉测量的海量实测数据, 在保持精度的情况下, 如何提高处理速度是星载干涉合成孔径雷达 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 数据处理必须考虑的重要问题. 数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 重建是 InSAR 数据处理中较为耗时的一个关键环节. 针对星载 InSAR 处理中 DEM 快速重建的难题, 从 DEM 重建原理出发, 分析揭示了干涉相位与目标点三维坐标映射关系的两个基本特性, 一是目标点的三维坐标与干涉相位的关系可以分别用多项式来进行拟合, 二是 SAR 图像上相近像素各自对应的多项式变化不大, 并从理论上对特性的成立进行了论证. 基于此, 提出了一种快速 DEM 重建方法, 给出了快速算法的详细步骤及关键参数的取值方法. 最后, 利用德国最先进的在轨雷达卫星 TerraSAR-X 获取的重复轨道干涉数据进行快速 DEM 重建, 处理结果表明在重建精度损失较小的情况下, 显著提高了重建速度, 验证了该方法的高效性和正确性.

关键词 星载干涉合成孔径雷达 数字高程模型 重建 地理定位 快速算法

1 引言

星载干涉合成孔径雷达系统可以快速、高精度地测绘全球地形, 其获取的数据在军事及民用上都有巨大应用价值, 是 InSAR 技术的发展方向之一^[1~3]. 星载 InSAR 系统是以不同视角下获取的两幅或多幅 SAR 复图像数据的相位信息为信息源进而得到地表的三维信息. 为了获取所需的 SAR 复图像数据, 可采用多航过或单航过的模式. 多航过时, 通过一颗 SAR 卫星多次飞过同一测绘区域来获取所需数据, 如 ERS, ALOS PalSAR 等; 单航过时, 系统需具有多个接收通道, 一次飞过测绘区域就获取所需数据, 如 SRTM, TerraSAR-X 与 TanDEM-X 按螺旋轨道构形 (HELIX formation) 的工作模式^[4]等. DEM 重建是 InSAR 数据处理过程中的关键步骤. InSAR 系统获取的原始数据经成像、配准、干涉、滤波、解缠等处理后得到绝对干涉相位, DEM 重建即利用此干涉相位及雷达系统的轨道参数来反演 SAR 图像上每一像素所对应的地面三维空间坐标.

针对 InSAR 处理中的 DEM 重建问题, 目前已提出多种方法. 文献 [4~6] 研究了正侧视、平地假设下的 DEM 重建, 该方法重建得到的三维坐标误差较大; 文献 [7~9] 基于距离球、Doppler 锥和相位双曲面推导了 DEM 三维重建的解析解, 这些解析解的推导都是基于两幅干涉 SAR 图像的发射斜距重合或者重复轨道干涉测量模式的假设; 文献 [10~14] 研究了多通道、多基线、多频等情况下的

引用格式: 王青松, 黄海风, 董臻, 等. 一种星载 InSAR 高精度快速 DEM 重建方法. 中国科学: 信息科学, 2012, 42: 196-207

DEM 重建方法; 文献 [15,16] 研究了如何基于产品坐标格网快速获取高程的方法; 文献 [17,18] 研究了在 DEM 重建过程中如何利用已有的外部 DEM 数据源 (如 SRTM 获取的全球 DEM 数据), 其中文献 [17] 针对 ERS 获取的崎岖山地区域数据结合 SRTM 的低分辨率 DEM, 处理得到了很有意义的结果, 文献 [18] 基于最大似然估计方法来同时进行相位解缠和定位处理, 并且融合不同观测几何情况下的干涉相位图得到 DEM. 综上所述, 针对 DEM 重建问题的研究已经取得了一系列成果. 但星载 InSAR 系统的一个重要任务是进行全球测绘, 获取全球高精度 DEM 产品. 目前的 DEM 重建方法在处理海量实测数据时往往难以克服处理速度与重建精度的矛盾. 德国空间局 (German Aerospace Center, DLR) 计划利用 TerraSAR-X 和 TanDEM-X 在三年内完成全球 DEM 测量^[1,2], 预计获取的数据量将大于 1300 TB (SRTM 全球数据量约 9.8 TB). 因此, 面对如此海量实测数据, 在保证精度的情况下, 如何提高数据处理速度是一个亟待解决的重要问题.

提高处理速度一般有两种途径: 一是提出新的方法从而减小运算量; 二是在多处理器计算平台上对算法进行并行化处理. 由于 DEM 重建是逐点处理, 可以采用多处理器并行运算来提高处理速度^[19]. 本文的研究属于第一种情况, 是通过提出新方法减少运算量从而减少处理时间.

在分析揭示了干涉相位与目标点三维坐标映射关系的两个基本特性基础上, 本文提出了一种星载 InSAR 系统的高精度快速 DEM 重建方法, 该方法不但解决了 DEM 重建运算量非常大的问题, 极大地提高了运算速度, 而且在 DEM 重建精度上也完全能满足实际工程处理要求, 文章最后针对 TerraSAR-X 重复轨道实测数据的处理结果验证了方法的有效性.

2 DEM 重建原理及特性分析

星载 InSAR 系统 DEM 重建是基于处理得到的绝对干涉相位及卫星雷达轨道数据, 结合干涉相位方程、斜距方程和 Doppler 方程来联立求解目标点的三维坐标. 根据系统几何模型可以列出干涉相位方程为^[9,20]

$$(|\mathbf{S}_{1S} - \mathbf{P}| + |\mathbf{S}_{1R} - \mathbf{P}|) - (|\mathbf{S}_{2S} - \mathbf{P}| + |\mathbf{S}_{2R} - \mathbf{P}|) = \frac{\lambda\phi}{2\pi}. \quad (1)$$

SAR 图像 $i(i = 1, 2)$ 的斜距方程为

$$|\mathbf{S}_{1S} - \mathbf{P}| + |\mathbf{S}_{1R} - \mathbf{P}| = 2r_1, \quad (2)$$

$$|\mathbf{S}_{2S} - \mathbf{P}| + |\mathbf{S}_{2R} - \mathbf{P}| = 2r_2. \quad (3)$$

卫星 1 的 Doppler 方程为

$$f_{dc1} = -\frac{(\mathbf{V}_{1S} - \mathbf{V}_P) \cdot (\mathbf{S}_{1S} - \mathbf{P})}{\lambda |\mathbf{S}_{1S} - \mathbf{P}|} - \frac{(\mathbf{V}_{1R} - \mathbf{V}_P) \cdot (\mathbf{S}_{1R} - \mathbf{P})}{\lambda |\mathbf{S}_{1R} - \mathbf{P}|}, \quad (4)$$

其中, $\mathbf{S}_{iS}$, $\mathbf{S}_{iR}(i = 1, 2)$ 分别对应于 SAR 图像 i 的发射、接收星的位置矢量, $\mathbf{V}_{iS}$, $\mathbf{V}_{iR}(i = 1, 2)$ 分别对应于 SAR 图像 i 的发射、接收星的速度矢量, $\mathbf{V}_p$, $\mathbf{P}$ 分别对应地面目标点的速度、位置矢量, 在地心固定坐标系下 $\mathbf{V}_p$ 等于 0 矢量, $r_i(i = 1, 2)$ 分别对应于 SAR 图像 i 的斜距, λ 为波长, f_{dc1} 对应于卫星 1 的 SAR 图像成像时 Doppler 中心频率, ϕ 是绝对干涉相位.

对于 SAR 图像中的每一点, 在已知绝对干涉相位、卫星雷达轨道数据和 SAR 图像信息情况下, DEM 重建即根据式 (1)~(4) 求解出目标点的三维坐标 $\mathbf{P} = (x, y, z)$. 值得提出的是, 求解式 (1)~(4) 时, SAR 图像 2 的斜距是通过 SAR 图像 1 的斜距结合干涉相位所对应的波程差得到. 逐点重复上述过程, 即可得到整幅场景的三维坐标信息.

上述方程组中含非线性方程, 对方程组进行求解时需要采用迭代的方法. 但是, 存在如下两种情况, 则不需要采用迭代法, 可以直接求出精确的闭合解析解: (1) 系统一颗星发射信号, 其他星和发射星自身都接收信号, 并且对各目标点, 发射斜距完全重合; (2) 系统各颗星都为自发自收. 第一种情况在理论上虽然存在, 实际中却不可能满足这一条件. 第二种情况即多航过重复轨道干涉模式.

常规迭代求解 DEM 重构方法在处理实际海量数据时对计算设备的内存分配和计算量都需求巨大, 因此有必要提高处理速度, 寻找快速处理方法. 分析发现, 星载 InSAR 系统的空间几何模型决定了: ①对于 SAR 图像上任一像素所对应的地面散射单元的三维坐标 $\mathbf{P} = (x, y, z)$ 与绝对干涉相位 ϕ 的关系可以分别用多项式 $(p_x(\phi), p_y(\phi), p_z(\phi))$ 来描述; ②在局部区域内, SAR 图像上相近像素各自对应的多项式 $(p_x(\phi), p_y(\phi), p_z(\phi))$ 变化不大. 快速 DEM 重建方法的构建正是基于这两个特性. 特性②显然成立, 这是因为局部区域内对应的星载干涉测量几何关系变化很小, 下面对特性①进行论证.

为了便于理论分析, 假设在重复轨道双航过情况下 (此时 DEM 重构方程组存在解析解), 如 TerraSAR-X 的重复轨道干涉, 则 $\mathbf{S}_{iS} = \mathbf{S}_{iR}$, 令 $\mathbf{S}_{iS} = \mathbf{S}_{iR} = \mathbf{S}_i = (x_{Si}, y_{Si}, z_{Si})$, $\mathbf{V}_{iS} = \mathbf{V}_{iR} = \mathbf{V}_i = (x_{Vi}, y_{Vi}, z_{Vi})$. 分析 SAR 图像任一固定像素 (a, r) 处, 地面散射单元的三维坐标 $\mathbf{P} = (x, y, z)$ 与绝对干涉相位 ϕ 的关系, 将式 (2), (3) 代入式 (1), (4) 后, 可以得到上述方程组的解析解

$$\mathbf{P} = \mathbf{S}_1 + \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}, \quad (5)$$

其中 $\mathbf{r} = k_1 \cdot \mathbf{v} + k_2 \cdot \mathbf{b} \pm k_3 \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{v})$, $k_1 = \frac{A_1 - \mu \cdot A_2}{1 - \mu^2}$, $k_2 = \frac{A_2 - \mu \cdot A_1}{1 - \mu^2}$, $k_3 = \frac{\sqrt{(1 - A_1^2)(1 - A_2^2) - (\mu - A_1 \cdot A_2)^2}}{1 - \mu^2}$, $\mu = \mathbf{v} \cdot \mathbf{b}'$, $\mathbf{A}_1 = \frac{\lambda \cdot f_{dc1}}{2|\mathbf{V}_1|}$, $\mathbf{A}_2 = \frac{1}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|} \left(\frac{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 - \left(\frac{\lambda\phi}{4\pi}\right)^2}{2r_1} - \frac{\lambda\phi}{4\pi} \right)$, $\mathbf{v} = \frac{\mathbf{V}_1}{|\mathbf{V}_1|}$, $\mathbf{b} = \frac{\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|}$.

式 (5) 给出的两个解分别位于 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{b}$ 构成平面两侧, 由于 $\mathbf{P} = (x, y, z)$ 在地球上, 因此很容易剔除伪解. 不妨假设用 m 阶多项式来拟合地面散射单元的三维坐标 $\mathbf{P} = (x, y, z)$ 与绝对干涉相位 ϕ 的关系, $\mathbf{P} = (x, y, z)$ 对 ϕ 求导

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{P}}{d\phi} &= \frac{-r_1\mu}{(1-\mu^2) \cdot |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|} \cdot \left(-\frac{\lambda}{4\pi} - \frac{\lambda^2\phi}{16\pi^2 r_1} \right) \cdot \mathbf{v} + \frac{r_1}{(1-\mu^2) \cdot |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|} \cdot \left(-\frac{\lambda}{4\pi} - \frac{\lambda^2\phi}{16\pi^2 r_1} \right) \cdot \mathbf{b} \\ &+ \frac{r_1 \left(\frac{\mu \mathbf{A}_1 \left(-\frac{\lambda}{2\pi} - \frac{\lambda^2\phi}{8\pi^2 r_1} \right)}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|} - \frac{\left(-\frac{\lambda}{2\pi} - \frac{\lambda^2\phi}{8\pi^2 r_1} \right) \left(-\frac{\lambda\phi}{4\pi} + \frac{16\pi^2 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 - \lambda^2\phi^2}{32\pi^2 r_1} \right)}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2} \right)}{(1-\mu^2) \cdot \sqrt{1 - \mu^2 - \mathbf{A}_1^2 + \frac{\mu \mathbf{A}_1 \left(-\frac{\lambda\phi}{2\pi} + \frac{16\pi^2 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 - \lambda^2\phi^2}{16\pi^2 r_1} \right)}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|} - \frac{\left(-\frac{\lambda\phi}{4\pi} + \frac{16\pi^2 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 - \lambda^2\phi^2}{32\pi^2 r_1} \right)^2}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2}}} \\ &\cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{v}). \end{aligned} \quad (6)$$

当用 m 阶多项式拟合目标点的三维坐标与绝对干涉相位的关系时, 如要分析 m 阶多项式的拟合精度, 根据 Taylor 展开余项定理需要求取 $\frac{d^{m+1}\mathbf{P}}{d\phi^{m+1}}$. 分别分析 2 阶和 3 阶多项式各自的拟合精度, 由式 (6) 可知, $\frac{d\mathbf{P}}{d\phi}$ 的前两项均是 ϕ 的二次项, 因此 $\frac{d^3\mathbf{P}}{d\phi^3}$, $\frac{d^4\mathbf{P}}{d\phi^4}$ 的结果只与 $\frac{d\mathbf{P}}{d\phi}$ 的第 3 项有关. 为了进一步简化求取 $\frac{d^3\mathbf{P}}{d\phi^3}$, $\frac{d^4\mathbf{P}}{d\phi^4}$ 的过程, 不妨假设卫星雷达工作模式为正侧视, 此时 $\mathbf{A}_1 = \frac{\lambda \cdot f_{dc1}}{2|\mathbf{V}_1|} = 0$, $\mu = 0$. 则

可求得 $\frac{d^3 \mathbf{P}}{d\phi^3}$ 为

$$\begin{aligned} \frac{d^3 \mathbf{P}}{d\phi^3} = & \left(\frac{3 \left(-\frac{\lambda}{4\pi} - \frac{\lambda^2 \phi}{16\pi^2 r_1} \right)^3 \left(-\frac{\lambda \phi}{4\pi} + \frac{16\pi^2 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 - \lambda^2 \phi^2}{32\pi^2 r_1} \right)^3}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^6 \left(1 - \frac{\left(-\frac{\lambda \phi}{4\pi} + \frac{16\pi^2 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 - \lambda^2 \phi^2}{32\pi^2 r_1} \right)^2}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2} \right)^{5/2}} \right. \\ & - \frac{3 \left(-\frac{\lambda}{4\pi} - \frac{\lambda^2 \phi}{16\pi^2 r_1} \right)^3 \left(-\frac{\lambda \phi}{4\pi} + \frac{16\pi^2 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 - \lambda^2 \phi^2}{32\pi^2 r_1} \right)}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^4 \left(1 - \frac{\left(-\frac{\lambda \phi}{4\pi} + \frac{16\pi^2 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 - \lambda^2 \phi^2}{32\pi^2 r_1} \right)^2}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2} \right)^{3/2}} \\ & + \frac{3\lambda^2 \left(-\frac{\lambda}{4\pi} - \frac{\lambda^2 \phi}{16\pi^2 r_1} \right) \left(-\frac{\lambda \phi}{4\pi} + \frac{16\pi^2 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 - \lambda^2 \phi^2}{32\pi^2 r_1} \right)^2}{16 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^4 \pi^2 r_1 \left(1 - \frac{\left(-\frac{\lambda \phi}{4\pi} + \frac{16\pi^2 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 - \lambda^2 \phi^2}{32\pi^2 r_1} \right)^2}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2} \right)^{3/2}} \\ & \left. + \frac{3\lambda^2 \left(-\frac{\lambda}{4\pi} - \frac{\lambda^2 \phi}{16\pi^2 r_1} \right)}{16 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 \pi^2 r_1 \left(1 - \frac{\left(-\frac{\lambda \phi}{4\pi} + \frac{16\pi^2 |\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2 - \lambda^2 \phi^2}{32\pi^2 r_1} \right)^2}{|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2|^2} \right)^{1/2}} \right) \\ & \cdot \frac{r_1}{1 - \mu^2} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{v}). \end{aligned} \quad (7)$$

不失一般性, 以 $p_z(\phi)$ 为例分析 2 阶多项式近似所引起的误差, $p_x(\phi)$, $p_y(\phi)$ 以此类推. 由 Taylor 展开余项定理可知, 函数 $f_z(\phi)$ 在包含已知点 $\phi_i, i = \{0, 1, 2\}$ 的区间 $[\phi_a, \phi_b]$ 内用 2 阶多项式 $p_z(\phi)$ 近似时, 存在 $\xi \in (\phi_a, \phi_b)$ 使得在点 $\phi \in [\phi_a, \phi_b]$ 处的近似误差为

$$E(f_z(\phi); \phi) = f_z(\phi) - p_z(\phi) = \frac{\omega(\phi)}{(2+1)!} f_z^{2+1}(\xi), \quad (8)$$

其中 $\omega(\phi) = (\phi - \phi_0)(\phi - \phi_1)(\phi - \phi_2)$.

精确地求取 $E(f_z(\phi); \phi)$ 比较复杂, 我们可以求取误差上限, 即多项式近似精度最差的情况, 将 TerraSAR-X 的相应参数代入计算, 此时

$$E(f_z(\phi); \phi) = \frac{\omega(\phi)}{3!} \frac{d^3 z}{d\phi^3} \leqslant \max \left(\frac{\omega(\phi)}{3!} \right) \cdot \max \left(\frac{d^3 z}{d\phi^3} \right) \leqslant \frac{|\phi_a - \phi_b|^3}{3!} \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

式中 $\frac{d^3 z}{d\phi^3}$ 由 $\frac{d^3 \mathbf{P}}{d\phi^3} = \left[\frac{d^3 x}{d\phi^3} \quad \frac{d^3 y}{d\phi^3} \quad \frac{d^3 z}{d\phi^3} \right]$ 得到, $[\phi_a, \phi_b]$ 对应于文章第 3 节的重采样窗口内干涉相位的变化范围. 根据上述分析结果可知, 2 阶多项式的近似精度如能满足需求, 则对粗采样窗口内相位变化范

围 $|\phi_a - \phi_b|$ 的要求较为苛刻, 而且在实际数据处理中, 由于文章第 3 节分析的 3 点原因, 多项式的近似精度会进一步下降, 从而导致 2 阶多项式并不能够满足精度需求. 笔者利用 2 阶多项式针对第 4 节的实测数据进行处理, 当粗采样间隔为 8×8 时 DEM 三维坐标的重建误差均大于 0.9 m, 该精度在工程上是不能容忍的. 分析 3 阶多项式的拟合精度, 同理, 函数 $f_z(\phi)$ 在包含已知点 $\phi_i, i = \{0, 1, 2, 3\}$ 的区间 $[\phi_a, \phi_b]$ 内用 3 阶多项式 $p_z(\phi)$ 近似时, 存在 $\xi \in (\phi_a, \phi_b)$ 使得在点 $\phi \in [\phi_a, \phi_b]$ 处的近似误差为

$$E(f_z(\phi); \phi) = f_z(\phi) - p_z(\phi) = \frac{\omega(\phi)}{(3+1)!} f_z^{3+1}(\xi), \quad (10)$$

其中 $\omega(\phi) = (\phi - \phi_0)(\phi - \phi_1)(\phi - \phi_2)(\phi - \phi_3)$. 将 TerraSAR-X 的相应参数代入计算, 此时

$$E(f_z(\phi); \phi) = \frac{\omega(\phi)}{4!} \frac{d^4 z}{d\phi^4} \leq \max \left(\frac{\omega(\phi)}{4!} \right) \cdot \max \left(\frac{d^4 z}{d\phi^4} \right) \leq \frac{|\phi_a - \phi_b|^4}{4!} \cdot 10^{-15}, \quad (11)$$

式中 $\frac{d^4 z}{d\phi^4}$ 由 $\frac{d^4 P}{d\phi^4} = \begin{bmatrix} \frac{d^4 x}{d\phi^4} & \frac{d^4 y}{d\phi^4} & \frac{d^4 z}{d\phi^4} \end{bmatrix}$ 得到, $[\phi_a, \phi_b]$ 对应于文章第 3 节的重采样窗口内干涉相位的变化范围. 上述分析结果表明, 当粗采样窗口内相位取值区间 $[\phi_a, \phi_b]$ 满足 $|\phi_a - \phi_b| \ll \sqrt[4]{4!} \times 10^{15}$ 时, 用 3 阶多项式对相位到坐标的转换关系进行近似, 其近似精度完全能满足需求. 文章第 3 节给出了决定相位取值区间 $[\phi_a, \phi_b]$ 的关键参数 $\Delta\phi_i$ 的取值方法, 从而使得 3 阶多项式的精度能够满足实际要求. 在实际数据处理中可以根据精度需求和处理时间的限制来选择合理的多项式阶数.

3 快速 DEM 重建方法

在第 2 节中, 分析揭示了星载 InSAR 系统空间几何模型决定的两个基本特性. 快速 DEM 重建方法正是基于这两个特性而提出的, 其具体思想是: 首先对原始绝对干涉相位图进行粗采样, 得到粗采样后干涉相位图, 并将粗采样后干涉相位叠加 n 个固定相位偏差 $\Delta\phi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别生成 n 幅干涉相位图, 对每幅粗采样后衍生得到的干涉相位图依据式 (1)~(4) 进行 DEM 重建, 结合衍生得到的 n 幅干涉相位图及其相应的 DEM 重建结果, 拟合出粗采样后网格点处 DEM 重建三维坐标与绝对干涉相位的 $m (m < n)$ 阶多项式; 然后通过对粗采样后网格点处的多项式进行双线性内插, 得到原始干涉相位每一像素处的多项式; 最后将每一像素处的绝对干涉相位代入其对应的多项式即可得到其对应三维坐标.

归纳起来, 以 3 阶多项式为例, 快速 DEM 重建方法实现的详细步骤为:

(1) 经过解缠等处理后得到的绝对干涉相位图 $\phi(a, r)$, 按照方位向间隔 k 个像素、距离向间隔 l 个像素进行重采样, 得到粗网格的绝对相位图 $\phi(a_c, r_c)$, 采样过程如图 1 所示.

(2) 对重采样后干涉相位图的每一个像素 $\phi(a_c, r_c)$, 假定一个相位偏差 $\Delta\phi$ (绝对相位更新为 $\phi(a_c, r_c) + \Delta\phi$), 然后求解式 (1)~(4), 则可以得到一组参数向量 $\{a_c, r_c, \phi(a_c, r_c) + \Delta\phi, \mathbf{P} = (x, y, z)\}$, 这一组向量可以精确地反映出重采样后干涉相位图像素 (a_c, r_c) 处卫星雷达与地面散射单元的干涉测量几何关系. 相位偏差 $\Delta\phi$ 取 4 个不同的值 ($\Delta\phi_1, \Delta\phi_2, \Delta\phi_3, \Delta\phi_4$) 重复上述过程 4 次 (图 1 示例性的给出了该过程的机理), 这样就可以得到 4 组能反映从绝对相位转换到地面目标点位置 $\mathbf{P}_i = (x_i, y_i, z_i), i = \{1, 2, 3, 4\}$ 几何特性的参数向量. 通过这 4 组向量在每一个重采样后像素 (a_c, r_c) 处可分别拟合出 3 个能够反映干涉测量几何关系的 3 阶多项式 $p_x(\phi), p_y(\phi), p_z(\phi)$, 它们各自独立地描述了地面目标点三维坐标 $\mathbf{P} = (x, y, z)$ 与绝对干涉相位 ϕ 的关系. 这一过程可以描述如下:

图 1 绝对干涉相位图重采样示意图

Figure 1 Flow-chart of the absolute phase resampling process

$$\begin{bmatrix} 1 & \phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_1 & (\phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_1)^2 & (\phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_1)^3 \\ 1 & \phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_2 & (\phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_2)^2 & (\phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_2)^3 \\ 1 & \phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_3 & (\phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_3)^2 & (\phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_3)^3 \\ 1 & \phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_4 & (\phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_4)^2 & (\phi(a_c, r_c) + \Delta\phi_4)^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{0x} & c_{0y} & c_{0z} \\ c_{1x} & c_{1y} & c_{1z} \\ c_{2x} & c_{2y} & c_{2z} \\ c_{3x} & c_{3y} & c_{3z} \end{bmatrix} \\
 = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

则

$$p_x(\phi) = c_{0x} + c_{1x}\phi + c_{2x}\phi^2 + c_{3x}\phi^3, \quad (13)$$

$$p_y(\phi) = c_{0y} + c_{1y}\phi + c_{2y}\phi^2 + c_{3y}\phi^3, \quad (14)$$

$$p_z(\phi) = c_{0z} + c_{1z}\phi + c_{2z}\phi^2 + c_{3z}\phi^3. \quad (15)$$

(3) 通过步骤 (2) 对重采样后干涉相位图的每一个像素 (a_c, r_c) 建立多项式后, 开始求解原始干涉相位图每一像素 (a, r) 处的参数多项式 $p'_x(\phi), p'_y(\phi), p'_z(\phi)$, 参数多项式 $p'_x(\phi), p'_y(\phi), p'_z(\phi)$ 是通过对像素 (a, r) 所在采样单元的 4 个顶点处的多项式进行双线性插值求得的, 不妨设像素 (a, r) 重采样后其所在采样单元的 4 个顶点的多项式为 $(p_x(\phi)_j, p_y(\phi)_j, p_z(\phi)_j), j = \{0, 1, 2, 3\}$, 则

$$p'_x(\phi) = \text{bilinear}([p_x(\phi)_j, j = \{0, 1, 2, 3\}]), \quad (16)$$

$$p'_y(\phi) = \text{bilinear}([p_y(\phi)_j, j = \{0, 1, 2, 3\}]), \quad (17)$$

$$p'_z(\phi) = \text{bilinear}([p_z(\phi)_j, j = \{0, 1, 2, 3\}]). \quad (18)$$

(4) 通过步骤 (3) 可以得到原始干涉相位图任一像素 (a, r) 处参数多项式 $p'_x(\phi), p'_y(\phi), p'_z(\phi)$, 将像素 (a, r) 处的原始绝对干涉相位 $\phi(a, r)$ 代入式 (16)~(18) 即可得到像素 (a, r) 处绝对干涉相位所对应

的地面目标点三维坐标 $\mathbf{P}(a, r) = (x(a, r), y(a, r), z(a, r))$:

$$\begin{cases} x(a, r) = p'_x(\phi(a, r)), \\ y(a, r) = p'_y(\phi(a, r)), \\ z(a, r) = p'_z(\phi(a, r)). \end{cases} \quad (19)$$

可以看到, 上述过程利用多项式近似极大地减少了重复迭代求解 3-D 方程组的次数, 缩减了运算量. 该算法中一个重要的环节就是步骤 (2) 中 $\Delta\phi_i$ 的取值方法.

由 Taylor 展开余项定理可知, 多项式的拟合精度不但与阶数有关, 还受 $\omega(\phi)$ 的影响. 因此, $\Delta\phi_i$ 的取值至关重要, 合理的取值将会提高多项式的拟合精度. 仔细分析, 合理的 $\Delta\phi_i$ 取值应该包含整个粗采样窗口内相位的变化范围, 原因有二: 一是能够保证在粗采样网格点上多项式具有较高的拟合精度; 二是能够保证通过粗网格点处的多项式内插得到任意一点处的多项式时仍然具有较高的拟合精度. 因此, $\Delta\phi_i$ 的取值由干涉条纹频率和粗采样间隔共同决定. 通过对干涉条纹图做二维 Fourier 变换可以得到干涉条纹的方位向和距离向频率 (f_a, f_r) . 当衍生干涉相位图数目 n 为奇数时, $\Delta\phi_i$ 的取值如下

$$\begin{cases} \Delta\phi_i = -i \cdot \frac{C \cdot 2\pi\sqrt{(f_a \cdot k)^2 + (f_r \cdot l)^2}}{n-1}, & i = 1, \dots, \frac{n-1}{2}, \\ \Delta\phi_i = 0, & i = \frac{n+1}{2}, \\ \Delta\phi_i = -\Delta\phi_{i-\frac{n+1}{2}}, & i = \frac{n+1}{2} + 1, \dots, n. \end{cases} \quad (20)$$

当衍生干涉相位图数目 n 为偶数时, ϕ_i 的取值如下

$$\begin{cases} \Delta\phi_i = -(2i-1) \cdot \frac{C \cdot 2\pi\sqrt{(f_a \cdot k)^2 + (f_r \cdot l)^2}}{2(n-1)}, & i = 1, \dots, \frac{n}{2}, \\ \Delta\phi_i = -\Delta\phi_{i-\frac{n}{2}}, & i = \frac{n}{2} + 1, \dots, n. \end{cases} \quad (21)$$

其中 k 为干涉相位图的方位向重采样间隔, l 为距离向重采样间隔, C 为常数, 为使得算法更加稳健, 一般情况下可令 $C = 1.5$. 当整个 DEM 重建区域的地形变化较为平缓时, 可以对整幅干涉相位图做二维 Fourier 变换, 得到整幅干涉图的方位向频率 f_a 和距离向频率 f_r ; 当 DEM 重建区域的地形变化较陡峭时, 可以将场景按照陡峭程度进行分块估计干涉图的方位向频率 f_a 和距离向频率 f_r , 分块大小一般远大于粗采样窗口的大小. 然后将估计得到的频率代入式 (20),(21) 求取 $\Delta\phi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 值.

4 实测数据处理与分析

为了验证本文快速 DEM 重建方法的有效性, 利用该方法对实测数据进行处理. 所用实测数据是 TerraSAR-X 于 2008 年 03 月 10 日和 2008 年 03 月 21 日获取的重复轨道干涉数据, 该数据中心位置的纬度为 36.0° 、经度为 248.1° , 位于美国的 Columbia 河与 Snake 河交汇处. 截取数据大小为 4381×3386 像素. 一景 TerraSAR-X 数据大小约为 32000×15000 (方位向 $\times$ 距离向) 像素, 数据文件头中含有 12 个时刻的卫星轨道状态数据, 持续时间约为 110 s, 每幅 SAR 图像方位向持续时间约为 8 s. 本文 DEM 重建所采用的卫星轨道数据是通过对上述 12 个时刻的卫星轨道状态数据多项式拟合后内插得到. 实测数据处理结果如图 2 所示.

图 2 重复轨道干涉数据处理结果

Figure 2 TerraSAR-X repeat-pass data-processing results. (a) TerraSAR-X SAR amplitude images; (b) interferogram after the SAR image registration; (c) interferogram after the removal of the flat-Earth phase; (d) interferogram after phase filtering and unwrapping; (e) DEM reconstruction results obtained using the conventional iterative method; (f) DEM reconstruction results obtained using the proposed method with intervals of 8×8

图 2(a) 显示了截取区域的 SAR 主、辅图像, 经配准后干涉相位处理结果如图 2 (b)~(d) 所示, 获取绝对干涉相位后, 利用多项式拟合内插得到的轨道数据, 逐点 DEM 重构结果如图 2(e) 所示. 由图 2(b) 的干涉条纹图可以看到实验区域地形变化较为平缓, 因此可以整体估计干涉条纹图的方位向频率 f_a 和距离向频率 f_r , 根据相应的采样间隔结合式 (21), 求取 $\Delta\phi_i (i = 1, 2, 3, 4)$. 为了评估算法在不同采样间隔下的性能, 取采样间隔为: 方位向 $(k) \times$ 距离向 $(l) = \{3 \times 3, 8 \times 8, 12 \times 12, 20 \times 20\}$, 图 2(f) 显示了按照 8×8 像素间隔采样后快速 DEM 重建结果. 以逐点 DEM 重建方法的计算结果为真值, 本文快速方法针对上述 4 种采样间隔重建得到的 DEM 三维坐标误差统计直方图如图 3 所示.

图 3 显示了在 X 方向上 DEM 重建误差相对于 Y, Z 两个方向较小, 这是因为干涉测量几何关系沿 SAR 图像方位向变化非常小, 而 X 方向与 SAR 图像的方位向夹角很小, Y, Z 方向几乎垂直于 SAR 图像的方位向. 所以, X 方向上的多项式拟合误差小于 Y, Z 方向, 由此引入的 DEM 重建误差也是较小的. 另外, 由图 3 还可以看到, DEM 实际重建误差大于第 2 节理论分析得到的 3 阶多项式近似误差. 仔细分析, 导致这一结果原因有 3 点: 一是第 2 节为了简化理论分析, 是基于正侧视假设

图 3 不同重采样间隔 DEM 重建误差直方图

Figure 3 DEM reconstruction errors of different sampling intervals. (a) Reconstruction error of X coordinate; (b) reconstruction error of Y coordinate; (c) reconstruction error of Z coordinate

表 1 快速 DEM 重建算法处理性能

Table 1 Mean square root error of DEM reconstruction

Sampling interval (pixel)	Run time (s)	Mean square root error of DEM reconstruction (m)		
		X	Y	Z
$1 \times 1^*$	2149.016	0	0	0
3×3	1055.237	0.02181	0.10939	0.12776
8×8	231.012	0.03745	0.18804	0.17574
12×12	148.702	0.04777	0.23992	0.21101
20×20	143.101	0.06165	0.30965	0.26130
20×4	196.519	0.02653	0.14713	0.13392

* 1×1 denotes no resampling, i.e., the point-by-point DEM reconstruction was applied.

情况下的分析结果, 实际星载系统不可能是完全正侧视 (本文实测数据的平均 Doppler 中心频率为 -117.1 Hz); 二是前面理论分析的是 3 阶 Taylor 展开得到的多项式近似误差, 而在实际处理中, 多项式是通过拟合得到的, 其近似误差必然大于 Taylor 展开的近似误差; 三是重采样后粗网格格点上的多项式是通过拟合得到, 而绝大多数像素处的多项式是通过粗网格格点处的多项式内插得到, 这必然会进一步降低精度. 尽管实际处理结果精度低于理论精度, 但是仍能满足实际工程处理需求.

表 1 列出了针对上述场景逐点 DEM 重建方法与快速 DEM 重建方法性能比较情况, 其中以逐点法的 DEM 重建结果为真值, 比较不同重采样间隔的快速重建算法的性能. 为了验证前面的关于方位向重采样间隔可以大于距离向重采样间隔这一结论, 表 1 还给出了采样间隔为: 方位向 (k) $\times$ 距离向 (l) = 20×4 的处理结果. 实验环境为 Inter Core2 Quad CPU 2.33 GHz, 内存 2 GB, 程序语言为 IDL.

由表 1 可知快速 DEM 重建算法随着采样间隔的增大, 运算时间迅速减少, 但重建结果的三维坐标精度下降却较为缓慢, 在实际工程处理中可以根据精度要求或者运算时间限制采取合适的采样间隔和适当的多项式阶数, 从而在保证精度的前提下最大限度地节省 DEM 重建处理时间. 由于多项式各阶系数在方位向的变化要小于距离向变化, 相比较而言, 在实际处理中, 方位向重采样间隔可以大于距离向重采样间隔. 由表 1 可知采样间隔 20×4 的 DEM 重建精度优于采样间隔 8×8 , 而其处理时间却要少. 因此, 采用合理的方位向与距离向采样间隔能够获得更优的 DEM 重建精度和计算效率.

5 结论

利用星载 InSAR 系统进行全球测绘获取 DEM 产品时, 面对海量数据, 在保持精度的情况下, 如何提高处理速度是 InSAR 数据处理必须考虑的重要问题, DEM 重建是 InSAR 处理步骤中较为耗时的一个环节. 针对 DEM 重建问题的研究已经取得了一系列成果. 但星载 InSAR 系统的一个重要任务是进行全球测绘, 获取全球高精度 DEM 产品. 目前的 DEM 重建方法在处理海量实测数据时往往难以克服处理速度与重建精度的矛盾. 本文分析揭示了星载 InSAR 系统的两个基本特性, 提出了一种快速 DEM 重建方法, 并给出了该方法关键参数的取值通式. 基于 2008 年 03 月 10 日和 2008 年 03 月 21 日 TerraSAR-X 获取的重复轨道干涉数据, 用本文的快速方法进行 DEM 重建. 重建结果误差图表明了本文快速方法的有效性, 在降低运算量的情况下保持了较高的精度. 文中针对实测数据的处理耗时及精度结果表明, 本文高精度快速 DEM 重建方法在 InSAR 全球测绘海量数据处理中可发挥重要作用.

致谢 感谢 DLR 和 Infoterra 公司提供的 TerraSAR-X 实测数据, 从而使得本文提出的方法能够在处理实测数据中得以检验. 感谢 DLR 的 Michael Eineder, 与他的多次讨论使我受益匪浅. 感谢审稿专家提出的修改意见.

参考文献

- 1 Krieger G, Moreira A, Fiedler H, et al. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remot*, 2007, 45: 3317–3341
- 2 Krieger G, Zink M, Fiedler H, et al. The tandem-X mission: overview and status. In: *IEEE Radar Conference*. New York: IEEE, 2009. 372–376
- 3 Farr T G, Hensley S, Rodriguez E, et al. The shuttle radar topography mission. In: *Ceos SAR Workshop*. Montana: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2000. 361–363
- 4 Rodriguez E, Martin M J. Theory and design of interferometric synthetic aperture radar. *IEE Proc*, 1992, 139: 147–159
- 5 Goblirsch W. The exact solution of imaging equations for crosstrack interferometers. In: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Singapore: IEEE, 1997. 439–441
- 6 Xiang Z, Wang K Z, Liu X Z. A new DEM reconstruction method based on an accurate flattening algorithm in interferometric SAR. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP*. Las Vegas: IEEE, 2008. 1093–1096
- 7 Sansosti E. A simple and exact solution for the interferometric and stereo SAR Geolocation problem. *IEEE Trans Geosci Remot*, 2004, 42: 1625–1634
- 8 Chen P H, Dowman I J. A weighted least squares solution for space intersection of spaceborne stereo SAR data. *IEEE Trans Geosci Remot*, 2001, 39: 233–240
- 9 Nico G. Exact closed-form geolocation for SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remot*, 2002, 40: 220–222
- 10 Ferreti A, Prati C, Rocca F. Multibaseline InSAR DEM reconstruction: the wavelet approach. *IEEE Trans Geosci Remot*, 1999, 37: 705–715
- 11 Parizzi A, Perissin D, Prati C. Accurate DEM reconstruction from permanent scatterers and multi-baseline interferometry. In: *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2006. 157–160
- 12 Ferraiuolo G, Meglio F, Pascazio V, et al. DEM reconstruction accuracy in multichannel SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remot*, 2009, 47: 191–201
- 13 Eineder M, Krieger G. Interferometric digital elevation model reconstruction - experiences from SRTM and multi channel approaches for future missions. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Seoul: IEEE, 2005. 2664–2667

- 14 Lanari R, Fornaro G, Riccio D, et al. Generation of digital elevation models by using SIR-C/X-SAR multifrequency two-pass interferometry: the Etna case study. *IEEE Trans Geosci Remot*, 1996, 34: 1097–1114
- 15 Schwabisch M. A fast and efficient technique for SAR interferogram geocoding. In: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Seattle: IEEE, 1998. 1100–1102
- 16 Schwabisch M. Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle. DLR Technical Report, 1995
- 17 Liao M S, Wang T, Lu L J, et al. Reconstruction of DEMs from ERS-1/2 tandem data in mountainous area facilitated by SRTM data. *IEEE Trans Geosci Remot*, 2007, 45: 2325–2335
- 18 Eineder M, Adam N. A maximum-likelihood estimator to simultaneously unwrap, geocode, and fuse SAR interferograms from different viewing geometries into one digital elevation model. *IEEE Trans Geosci Remot*, 2005, 43: 24–36
- 19 Wang M, Liang D N, Yu A X, et al. SBRAS: an advanced simulator of spaceborne radar. In: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Barcelona: IEEE, 2007. 695–697
- 20 Mora O, Agusti O, Bara M, et al. Direct geocoding for generation of precise wide-area elevation models with ERS SAR data. In: *European Space Agency Special Publication*. Liege: European Space Agency, 2000. 449–455

High-precision, fast DEM reconstruction method for spaceborne InSAR

WANG QingSong*, HUANG HaiFeng, DONG Zhen, YU AnXi & LIANG DianNong

School of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

*E-mail: yilingsql@126.com

Abstract The primary objective of the spaceborne interferometric synthetic aperture radar (InSAR) system is to develop a consistent global digital elevation model (DEM). The improvement of the processing speed in global interferometry missions while maintaining the accuracy is becoming an important issue. DEM reconstruction is the most time-consuming step in the data processing required for spaceborne InSAR. Based on a DEM reconstruction principle analysis, we exploited two basic characteristics of the mapping relation between the interferometric phase and 3-D position of target point. First, the relation between the 3-D position of the target point and the interferometric phase can be approximated using polynomials. Second, the corresponding polynomials change slowly in the local SAR images. Also, we verified the foundations of the two mentioned characteristics theoretically. Then, we proposed a fast method of DEM reconstruction based on this analysis. Detailed descriptions of the step and key parameters of the fast algorithm are provided. Finally, the repeat-pass interferometric data obtained using TerraSAR-X was used to test the presented method. The experimental results showed that a significant reduction in computation time is achieved with only a small loss in accuracy. The effectiveness and correctness of the proposed method were also validated.

Keywords spaceborne InSAR, DEM, reconstruction, geolocation, fast algorithm

WANG QingSong was born in 1983. He received the Ph.D. degree in information and communication engineering from National University of Defense Technology, Changsha in 2011. Currently, he is working in the Third Research Institute of Arming Academy, Second Artillery. His research interests include spaceborne InSAR data processing techniques, calibration techniques, and SAR image geolocation.

HUANG HaiFeng was born in 1976. He received the Ph.D. degree in School of Electronic Science and Engineering from National University of Defense Technology, Changsha in 2005. Currently, he is a Vice Professor in National University of Defense Technology. His research interests include distributed SAR, InSAR, PolInSAR and bistatic/multistatic radar. He has been engaged in the research for more than 10 years.

DONG Zhen was born in 1973. He received the Ph.D. degree in processing of signal and information from National University of Defense Technology, Changsha in 2001. Currently, he is a Senior Researcher at School of Electronic Science and Engineering. His research interests include synthetic aperture radar (SAR) imaging and interferometry, array signal processing, etc.