

一种改进的基于 DEM 的机载重轨干涉 SAR 运动补偿算法

唐晓青^{①②} 向茂生^① 吴一戎^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 该文研究了基于 DEM(Digital Elevation Model)的高精度重轨干涉 SAR 运动补偿算法。分析了平地假设及波束中心近似造成的残余运动误差的影响,表明对重轨干涉 SAR 系统进行基于 DEM 的高精度运动补偿的必要性。分析了对外部 DEM 数据精度要求,指出利用低精度 DEM 数据进行精确运动补偿获取高精度 DEM 数据的可行性。针对现有基于 DEM 运动补偿算法的不足提出改进算法。该算法根据载机轨迹偏移和地形起伏自动调节参数,可实现精确且高效的运动补偿。对 X 波段重轨干涉 SAR 数据进行运动补偿处理,验证了该算法的有效性及其在精度和效率两方面相比于现有算法的优势。

关键词: 干涉 SAR; 机载重轨干涉测量; 运动补偿; DEM; 残余运动误差; 波束中心近似

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)05-1090-05

An Improved Topography-Dependent Motion Compensation Approach for Airborne Repeat-Pass Interferometric SAR Systems

Tang Xiao-qing^{①②} Xiang Mao-sheng^① Wu Yi-rong^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the precise topography-dependent motion compensation for repeat-pass InSAR is studied. The effects of the residual motion errors caused by the flat surface assumption and center-beam approximation are analyzed, which shows the necessity of performing a precise topography-dependent motion compensation for the repeat-pass InSAR systems. The precision requirement for the external DEM data is analyzed to show the feasibility of deriving precise DEM data by motion compensation based on rough DEM data. An improved approach is presented according to the deficiencies of the existing topography-dependent motion compensation approaches. It can adjust the parameters according to the conditions of trajectory deviations and topography variations, so it has the advantage of performing the precise motion compensation efficiently. Finally, the processing results of the X-band airborne repeat-pass interferometric SAR data confirm its validity and superiority in precision and efficiency compared to the original algorithms.

Key words: InSAR; Airborne repeat-pass interferometry; Motion compensation; DEM; Residual motion errors; Center-beam approximation

1 引言

重轨干涉 SAR 系统双通道的运动误差相互独立,无法通过计算干涉相位相互抵消,因而相比于双天线干涉 SAR 系统,要求对单个通道的数据进行更高精度保相的运动补偿^[1]。

通常, SAR 系统和双天线干涉 SAR 系统采用的两级运动补偿算法存在两方面近似^[2-4],一是对场景作平地假设,忽略了地形的变化;二是对整个合成孔径长度内照射的所有目标按照波束中心照射方向的运动误差进行补偿,忽略了随方位向空变的误差分量。这些近似造成的残余运动误差直接

引起高程误差。因此,有必要研究考虑地形变化和波束照射角度变化影响的高精度运动补偿算法,即基于 DEM 的高精度重轨干涉 SAR 运动补偿算法。

德国 DLR 的研究者针对这一问题相继提出了考虑地形的重轨干涉 SAR 运动补偿算法^[3]和 PTA(Precise Topography and Aperture-dependent motion compensation)算法^[4]。但这两种算法都存在一定的不足,前者受到频域和时域分辨率矛盾的限制,精度有限,对于合成孔径时间较长的系统在运动轨迹偏移较大、地形变化剧烈的情况下无法实现高精度的运动补偿;后者精度高但运算量大,难以应用于大批量数据处理。

本文首先推导了平地假设和波束中心近似造成的残余

运动误差表达式并分析其对干涉相位的影响,指出对重轨干涉 SAR 系统进行基于 DEM 的高精度运动补偿的必要性。并分析对外部 DEM 数据精度的要求,指明了基于低精度 DEM 数据进行精确运动补偿获取高精度 DEM 数据在原理上的可行性。分析总结了现有基于 DEM 的重轨干涉 SAR 运动补偿算法的不足,提出一种改进算法。该算法可以根据载机轨迹偏移和地形变化情况自动调整参数,在保证运动补偿精度的前提下最大限度提高运算效率,从而具有精度和效率的综合优势。

本文结构安排如下:第2节分析平地假设和波束中心近似造成的残余运动误差的影响;第3节分析对外部 DEM 数据的精度要求;第4节分析现有算法不足,并提出改进算法;第5节利用 X 波段机载重轨干涉 SAR 数据验证本文算法的有效性及其相比于现有算法的优势。

2 平地假设和波束中心近似造成的残余运动误差

图1表示了运动误差与载机轨迹偏移、地形和波束照射角度之间的几何关系。

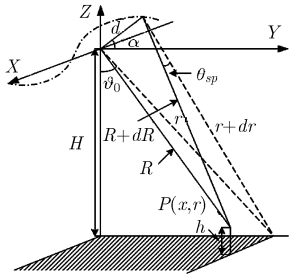


图1 运动误差几何关系示意图

X轴沿着载机飞行方向,Z轴垂直于地面,点划线为载机的实际运动轨迹, d 为交轨平面内载机偏离参考轨迹的距离, α 为 d 与XY平面的夹角, H 为载机飞行高度, ϑ_0 为波束中心的雷达视角, h 为目标点 P 的高程, θ_{sq} 为雷达照射目标点 P 的斜视角。 r 为交轨平面内目标点的斜距。 $R = \sqrt{(x' - x)^2 + r^2}$, dR 为载机运动轨迹偏移造成的斜距误差

$$\begin{aligned} dR(x', x' - x, r) & \simeq \sqrt{(x' - x)^2 + (r - d(x') \sin(\vartheta_0 - \alpha(x')))^2} \\ & - \sqrt{(x' - x)^2 + r^2} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\vartheta(x' - x, r) = \arccos[(H - h)/r]$ 。

通常采用的两级运动补偿,按照平地假设和波束中心近似补偿的斜距误差为^[5]

$$dr(x', r) \simeq -d(x') \sin(\vartheta_0 - \alpha(x')) \quad (2)$$

由式(1),式(2)可知,平地假设和波束中心近似造成的残余运动误差为

$$\delta e(x', x' - x, r) \simeq -d_{\perp}(x', \vartheta_0) \frac{\Delta h}{r \sin \vartheta_0} + \frac{d_{//}(x', \vartheta)(x' - x)^2}{2r^2} \quad (3)$$

$d_{\perp} = d \cos(\vartheta - \alpha)$, $d_{//} = d \sin(\vartheta - \alpha)$ 分别为载机轨迹偏移垂直和平行视线方向的分量。

式(3)中第1项为地形变化引起的残余误差,第2项为波束中心近似造成的残余误差。根据地形起伏和载机轨迹偏移情况的不同,残余运动误差具有不同的形式。假设整个合成孔径时间内载机轨迹偏移为常数,地形随方位向线性变化 $h(x) = h_0 + h' \cdot x$ 。此时,残余运动误差包括由地形变化引起的常数项 δe_0 (按照参考平面高程进行补偿)和线性误差项 δe_1 (按照波束中心处的高程值进行补偿),以及由波束中心近似引起的二次误差项 δe_2 。

$$\delta e_0 = -d_{\perp}(x', \vartheta_0) \frac{\Delta h}{r \sin \vartheta_0} \quad (4)$$

$$\delta e_1(x' - x, r) = -d_{\perp}(x', \vartheta_0) \frac{h'}{r \sin \vartheta_0} (x' - x) \quad (5)$$

$$\delta e_2 = \frac{d_{//}(x', \vartheta)(x' - x)^2}{2r^2} \quad (6)$$

由地形变化引起的 δe_0 和 δe_1 一方面在复图像中分别引入相位误差^[5]: $\Delta \varphi_0 = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{d_{\perp}(x', \vartheta_0)}{r \sin \vartheta_0} \Delta h$ 和 $\Delta \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda r}$

$\left[\frac{d_{//}(x', \vartheta_0)}{\sin \vartheta_0} h' \right]^2$;另一方面,造成图像的方位向偏移

$$\Delta x = -d_{\perp}(x', \vartheta_0) \frac{h'}{\sin \vartheta_0} \text{ 及 距离向偏移 } \Delta r = -\frac{d_{\perp}(x', \vartheta_0)}{r \sin \vartheta_0}$$

$\left[\Delta h - \frac{d_{\perp}(x', \vartheta_0)}{2r \sin \vartheta_0} h'^2 \right]$ 。由波束中心近似引起的 δe_2 会造成图像散焦,同时在复图像中引入相位误差^[5]: $\Delta \varphi_2 = -\frac{1}{6} \frac{\pi X^2}{\lambda r}$

$\frac{d_{//}(x', \vartheta)}{d_{//}(x', \vartheta) + 2r}$ 。

下面对于典型的X波段和L波段SAR系统,仿真了平地假设和波束中心近似导致的复图像相位误差 $\Delta \varphi_0$, $\Delta \varphi_1$ 和 $\Delta \varphi_2$ (等效于干涉相位误差),如图2所示(第1行对应X波段系统,第2行对应L波段系统)。可见,运动补偿算法中的平地假设和波束中心近似引起的干涉相位误差,随着地形误差增大、地形坡度增大、载机轨迹偏移增大及斜距减小而增大,且波长越短、合成孔径时间越长,影响越显著,因而对于重轨干涉SAR数据必须采用基于DEM的精确运动补偿算法。

3 精确运动补偿对 DEM 数据的精度要求

外部 DEM 数据误差同样会引入残余相位误差,因此必须对用于高精度运动补偿的外部 DEM 数据精度提出要求,但这并不与实现高精度高程重建的最终目的形成矛盾。下面将对利用低精度外部 DEM 数据进行运动补偿获取高精度 DEM 数据的可行性进行分析。

根据上节分析可以推导得到 DEM 误差与重建高程误差之间的关系如下:

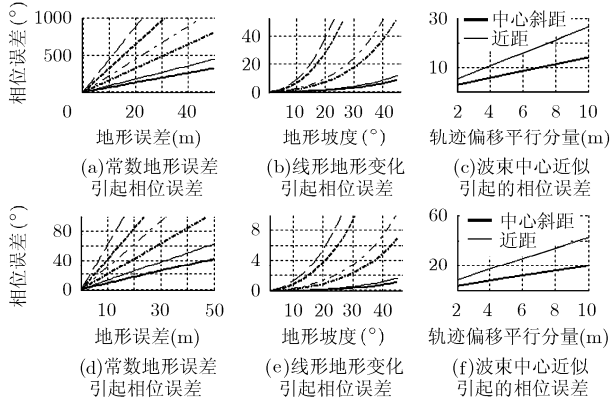


图2 平地假设及波束中心近似导致相位误差

(实线、点划线和虚线分别对应轨迹偏移 $d=2\text{m}$, 5m 和 10m ; 粗线和细线分别为中心斜距及近距端的误差;
(a)(b)(c)为 X 波段系统, (e)(d)(f)为 L 波段系统)

$$\delta h = (d_{\perp}/B_{\perp})\Delta h \quad (7)$$

其中 B_{\perp} 为基线垂直于视线方向的分量。由式(7)可知, 外部 DEM 数据误差引起的高程误差与轨迹偏移垂直分量及基线垂直分量的比值成正比, 即载机轨迹偏移与基线值相差越大对 DEM 的精度要求越低。载机运动轨迹发生偏移时, 雷达视角与理想直线运动情况下存在偏差, 从而引起随地形变化的残余相位误差, 其产生机理与干涉 SAR 系统通过构造基线形成干涉相位的原理相同。但重轨干涉 SAR 系统基线通常远大于载机运动轨迹偏移, 因而对外部 DEM 精度要求较低。假设 $B_{\perp}=20\text{m}$, $d_{\perp}=2\text{m}$, 则 10m 精度的外部 DEM 数据即可满足要求。因此利用低精度外部 DEM 数据进行运动补偿获取高精度 DEM 数据完全可行。

4 基于 DEM 的高精度运动补偿算法

4.1 原理

每个脉冲重复周期内接收的 SAR 原始回波信号是整个波束照射范围内的目标点回波的相干叠加, 在时域无法区分出单个目标点, 因而无法实现考虑地形的精确运动补偿。但是, 原始回波记录了目标点在整个合成孔径时间内的多普勒历史, 可以利用不同照射角度与方位向频率的对应关系^[3,4](如式(8)所示), 在频域中区分整个波束宽度内照射的不同目标点, 从而完成考虑各点地形及波束照射角度的精确运动补偿。

$$f_a = 2v \cdot \sin \theta_{sq} / \lambda \quad (8)$$

其中 f_a 为方位向频率, v 为载机速度, $\tan \theta_{sq} = (x' - x)/r$ 。

4.2 现有算法分析

现有的基于 DEM 的高精度运动补偿算法主要有两种: 考虑地形的重轨干涉 SAR 运动补偿算法^[3]和 PTA 算法^[4]。

(1)考虑地形的重轨干涉 SAR 运动补偿算法 此算法在二级运动补偿完成后, 方位向压缩前进行。首先对时域信号作方位向分块, 并进行短时傅里叶变换(STFT)。然后, 根

据方位向频率与斜视角的对应关系计算波束宽度内的不同目标点的残余运动误差, 并在频域完成对残余运动误差的补偿。

由于对一个分块内所有目标点按照其中心的残余运动误差进行补偿, 因而分块越大则近似误差越大。另外, 分块尺寸决定了频率分辨率, 即对地形变化的分辨能力, 分块越小则高程偏差越大。即此种方案存在着对应于载机运动的时域分辨率($\rho_t = W_{in}/PRF$ (单位: s), W_{in} 为方位向分块大小)和对应于地形变化的频域分辨率($\rho_x = (PRF \cdot \lambda r) / (2W_{in} \cdot v)$ (单位: m))互换的矛盾, 精度有限。但整个分块同时处理, 因而运算量相对较小。

(2)PTA 算法 该算法在方位向压缩完成后进行。对时域分块内的每个点均按照其高程值及对应的整个合成孔径时间内载机运动轨迹偏移量, 计算残余运动误差, 并在频域完成精确运动补偿。

由于是逐点进行补偿, 其地形分辨率与图像分辨率一致, 不存在时域与频域分辨率的矛盾, 分块足够大即能实现精确的运动补偿。但其运算量过大, 不适于处理大批量数据。

4.3 改进算法

本文将提出一种综合上述两种算法优点的改进算法。改进算法在二级运动补偿完成之后, 方位向压缩之前进行。根据地形的变化和载机轨迹偏移的剧烈程度, 在原有方位向分块的基础上将数据分成不同尺寸的二级分块。一级分块尺寸决定对地形的频域分辨率, 二级分块尺寸决定对载机运动的时域分辨率。通过设定判决准则选取二级分块尺寸, 能够在保证补偿精度的前提下最大限度地提高运算效率。下面将首先推导二级分块尺寸的选取标准。

对二级分块内的所有点利用其中心点对应的残余运动误差进行补偿, 当方位向一级分块足够大时可认为不存在地形偏差, 则分块近似造成的残余运动误差如式(9)所示:

$$\begin{aligned} & \delta e(x' + \Delta x', x + \Delta x', r) - \delta e_1(x', x, r) \\ & \simeq -d(x' + \Delta x') \cos(\vartheta_0 - \alpha(x' + \Delta x')) \frac{h(x + \Delta x') - h_0}{r \sin \vartheta_0} \\ & \quad + d(x') \cos(\vartheta_0 - \alpha(x')) \frac{h(x) - h_0}{r \sin \vartheta_0} + \frac{(x' - x)^2}{2r^2} \\ & \quad \cdot d(x' + \Delta x') \sin(\vartheta(x' + \Delta x', x + \Delta x', r) - \alpha(x' + \Delta x')) \\ & \quad - \frac{(x' - x)^2}{2r^2} d(x') \sin(\vartheta(x', x, r) - \alpha(x')) \\ & \simeq \frac{-\Delta d_y \cos \vartheta_0 - \Delta d_z \sin \vartheta_0}{r \sin \vartheta_0} \cdot (h(x) - h_0) \\ & \quad - \frac{d_y \cos \vartheta_0 + d_z \sin \vartheta_0}{r \sin \vartheta_0} \Delta h + \frac{(x' - x)^2}{2r^2} \\ & \quad \cdot \left(\Delta d_y \sin \vartheta_1 - \Delta d_z \cos \vartheta_1 - \frac{d_y \cos \vartheta_1 + d_z \sin \vartheta_1}{r \sin \vartheta_1} \Delta h \right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\vartheta_1 = \vartheta(x', x, r)$ 为二级分块中心对应的视角, $d_y = d \cos \alpha$, $d_z = d \sin \alpha$, Δd_y , Δd_z , Δh 分别为载机轨迹偏移量误差和高程误差, 随着各点与分块中心的距离 $\Delta x'$ 变

化。

因而可以按照如下标准判断二级分块大小是否满足要求:

$$\left| \frac{r \sin \vartheta_1}{B_1} \left[\left(|\Delta d_y \cos \vartheta_0| + |\Delta d_z \sin \vartheta_0| \right) \frac{h(x) - h_0}{r \sin \vartheta_0} \right] + \left| \frac{-d_y \cos \vartheta_0 - d_z \sin \vartheta_0}{r \sin \vartheta_0} \Delta h \right| + \frac{X^2}{8r^2} \cdot \left[|\Delta d_y \sin \vartheta_1| + |\Delta d_z \cos \vartheta_1| + \left| \frac{-d_y \cos \vartheta_1 - d_z \sin \vartheta_1}{r \sin \vartheta_1} \Delta h \right| \right] \right| < \sigma_h \quad (10)$$

其中 σ_h 为系统设计为运动补偿分配的高程误差容限。 Δd_y , Δd_z 取为二级分块中各点载机轨迹偏移量与中心点取值偏差的最大值, $\Delta h = E(|h(x' - x) - h(x' - x - \Delta x)|)$, Δx 为 1/2 的方位向分块长度, $E()$ 表示对整个合成孔径长度内的偏差值求平均。 ϑ_0 , ϑ_1 分别为一级和二级分块中心对应的视角。

改进算法的具体操作步骤如下, 其流程图如图 3 所示。

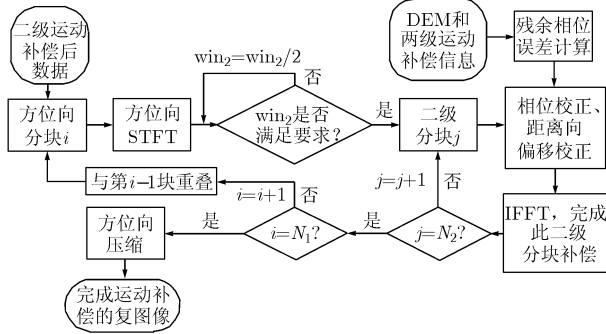


图 3 改进运动补偿算法流程图

(N_1 , N_2 分别为一级和二级分块数, win_2 为二级分块尺寸)

(1)对二级运动补偿完成之后, 方位向压缩之前的方位向时域信号进行方位向一级分块, 并进行短时傅里叶变换。

(2)根据载机运动轨迹偏移和地形变化的整体情况, 设定二级分块初始值, 判断式(10)是否成立, 如成立则进入步骤(3); 如不成立则将二级分块尺寸减半, 再次进行判断。依此循环, 当判断次数大于设定的极值时, 将二级分块大小置为 1。

(3)将二级分块中心对应的载机运动轨迹偏移量及频域内各点对应的波束照射目标点的高程值, 代入式(3)计算残余运动误差。在频域对整个一级分块按照该残余运动误差进行

补偿后作逆傅里叶变换, 取出对应二级分块的时域数据, 从而完成此二级分块的补偿。

(4)依次完成整个一级分块内所有二级分块的补偿。

(5)转入步骤(2), 对下一个一级分块进行补偿, 直至完成整块数据的精确补偿。

如数据的方位向点数为 Na , 一级分块大小为 Win , 二级分块大小为 win_2 , 距离向点数为 Nr , 则改进算法在二级运动补偿基础上增加了 $Na \cdot Nr$ 次 Win 点的 FFT, $\frac{Win \cdot Na \cdot Nr}{win_2}$ 次 Win 点的 IFFT, $\frac{Win \cdot Na \cdot Nr}{win_2}$ 次残余误差计算。表 1 列出了改进算法及 4.2 节中两种现有算法的运算量。可以看到改进算法运算量的最小值与考虑地形的重轨运动补偿算法相同, 最大值与 PTA 算法相同。

改进的运动补偿算法具有根据载机运动轨迹偏移和地形变化情况自动调节参数, 兼顾精度和运算效率的优点。该算法综合了两种现有算法的优点, 既能够在大成孔径长度情况下克服短时傅里叶变换的时域和频域分辨率之间的矛盾, 又能够灵活有效地控制运算量。另外, 由于是在方位向压缩前进行, 还可以加入距离向偏移校正, 消除距离向徙动对方位向聚焦效果的影响, 这一优势在残余误差较大的情况下将变得明显。

5 实验结果

对中国科学院电子学研究所的 X 波段机载双天线干涉 SAR 系统获取的重轨干涉 SAR 数据利用改进算法进行处理, 以验证该算法的有效性, 并从精度和效率两方面与现有算法进行比较。

选取一级分块尺寸为 32 点; 对于二级分块大小的选取, 设定高程误差标准为 $\sigma_h = 1m$ 。利用实际干涉相位与用 DEM 数据模拟的干涉相位进行共轭运算得到差分干涉相位, 当残余运动误差彻底消除时差分干涉相位为常数。如图 4(a), 4(b) 所示分别为通常采用的两级运动补偿算法和本文改进算法的处理结果。前者存在明显的随地形变化的残余相位误差, 而后者残余运动误差被消除, 残留的部分干涉条纹基本上可以归因于 DEM 数据平滑处理导致的误差。

将改进算法与 4.2 节中两种现有算法进行对比。如图 5(a) 所示, 为考虑地形的重轨干涉 SAR 运动补偿算法处理后的干涉相位与 PTA 算法结果的相位差, 图 5(b)为改进算法结

表 1 不同运动补偿算法运算量比较

| | 复数加法 | 复数乘法 | 残余误差计算 |
|--------|--|---|---------------------------------------|
| 现有算法 1 | $Na \cdot Nr \cdot \log_2 Win$ | $2Na \cdot Nr \cdot \log_2 Win$ | $Na \cdot Nr$ |
| PTA | $Na \cdot Nr \cdot \log_2 Win \cdot \frac{(1 + Win)}{2}$ | $Na \cdot Nr \cdot \log_2 Win \cdot (1 + Win)$ | $Na \cdot Nr \cdot Win$ |
| 改进算法 | $Na \cdot Nr \cdot \log_2 Win \cdot \frac{(1 + Win / win_2)}{2}$ | $Na \cdot Nr \cdot \log_2 Win \cdot \left(1 + \frac{Win}{win_2} \right)$ | $\frac{Na \cdot Nr \cdot Win}{win_2}$ |

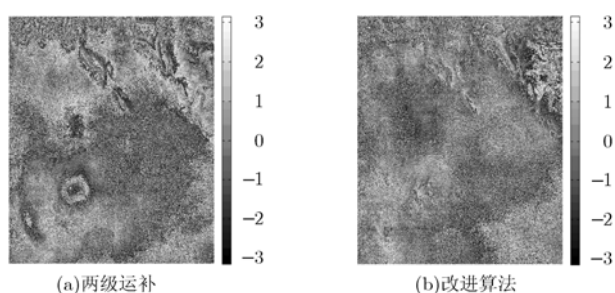


图 4 改进算法有效性验证

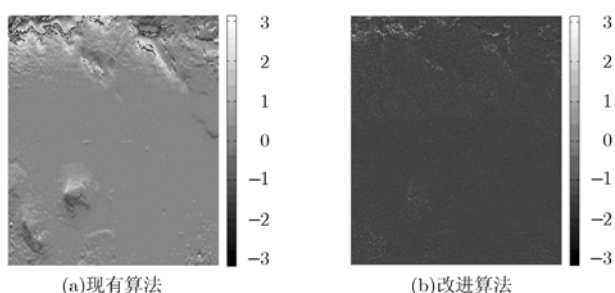


图 5 改进算法与现有算法精度对比

果与 PTA 算法结果的相位差。两算法均选取 32 点方位向分块大小, 由于方位向分块足够大, 可以认为 PTA 算法是精确的, 因而将其作为运动补偿精度的评价标准。可见, 考虑地形的重轨干涉 SAR 运动补偿算法结果在山地区域的残余运动误差仍然较为明显, 而本文改进算法结果中的残余运动误差则非常微弱。对比 3 种算法的运算时间: 考虑地形的重轨干涉 SAR 运动补偿算法对此块方位向 $2730 \times$ 距离向 4096 的数据处理时间为 20 min 17 s, PTA 算法时间为 1 h 4 min 58 s, 而本文改进算法为 25 min 57 s。

综合精度和运算效率两方面的比较结果, 改进算法的优势是明显的。

6 结束语

本文针对基于 DEM 数据的机载重轨干涉 SAR 运动补偿算法进行了深入研究。推导了通常的两级运动补偿采用平地假设和波束中心近似造成的残余运动误差表达式, 并分析了其对复图像及干涉相位的影响, 从而说明对于重轨干涉 SAR 系统进行基于 DEM 的高精度运动补偿的必要性。并通过对外部 DEM 数据精度要求的分析指出基于低精度 DEM 数据

进行精确运动补偿最终获取高精度 DEM 的可行性。分析了现有的两种基于 DEM 的运动补偿算法分别在精度和运算效率方面存在的不足, 提出一种改进算法。该算法在原有方位向分块的基础上进行二级分块处理, 制定了二级分块尺寸选取的判决准则, 能够根据载机运动轨迹偏移和地形变化情况自动调节二级分块尺寸, 从而在保证补偿精度的同时最大限度地提高运算效率。利用本文改进算法对重轨干涉 SAR 数据进行了处理, 结果验证了本文方法的有效性, 并通过与现有算法的对比显示了改进算法在精度和效率两方面的综合优势。

参考文献

- [1] Reigber A, Prats P, and Mallorqui J J. Refined estimation of time-varying baseline errors in airborne SAR interferometry [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(1): 145-149.
- [2] Fornaro G, Franceschetti G, and Perna S. On center-beam approximation in SAR motion compensation [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(2): 276-280.
- [3] Prats P, Reigber A, and Mallorqui J J. Topography-dependent motion compensation for repeat-pass interferometric SAR systems [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 206-210.
- [4] De Macedo K A C and Scheiber R. Precise topography- and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 172-176.
- [5] Fornaro G, Franceschetti G, and Perna S. Motion compensation errors: Effects on the accuracy of airborne SAR images [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(4): 1338-1352.

唐晓青: 女, 1982 年生, 博士生, 研究方向为机载干涉 SAR 运动补偿、干涉 SAR 仿真及运动误差影响分析。

向茂生: 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为干涉合成孔径雷达系统与方法的研究。

吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要研究领域包括星载/机载 SAR 信号处理、遥感图像几何与辐射校正、机载 InSAR 系统。