

同空间后向投影 InSAR 成像及干涉相位提取方法

韦顺军, 张晓玲, 师 君, 邹光浩

(电子科技大学电子工程学院, 成都 611731)

摘 要: 为了提高复杂运动情况干涉合成孔径雷达 (InSAR) 成像精度, 结合时域后向投影方法提出了一种基于同空间后向投影的 InSAR 成像与相位提取方法, 分析后向投影多普勒补偿函数与干涉相位的关系, 通过各天线回波投影到相同的成像空间, 再构造相位补偿函数进行相干积累成像。仿真和实测数据验证了复杂运动情况下本文方法较传统频域算法获得更好的 InSAR 成像和干涉相位质量, 且该方法还可在成像过程中实现 InSAR 图像配准、去平地效应的一体化处理, 简化了 InSAR 数据处理。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 后向投影算法; 干涉相位; 平地效应; 图像配准

中图分类号: TN957.52 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2015)03-0336-08

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.03.013

InSAR Imaging and Interferogram Extraction-Based the Same Space Back-Projection

WEI Shun-jun, ZHANG Xiao-ling, SHI Jun, ZOU Guang-hao

(Department of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: To improve interferometric synthetic aperture radar (InSAR) imaging accuracy in the case of complex motion, a time-domain imaging method is exploited in this paper, and a novel algorithm based on echo projecting to the same space is proposed for InSAR imaging and interferogram extraction. The relationship between the backward projection Doppler phase compensation function and the interferogram is also analyzed. In this theme, the echoes of the different antennas are projected into the same imaging space, and then InSAR images are obtained by using the coherent echoes integration with a modified Doppler phase compensation function. The simulated and the experimental airborne InSAR results demonstrate that the proposed algorithm can improve the quality of InSAR imaging and interferogram compared with the conventional frequency-domain method. In addition, our algorithm can achieve both image registration and earth-flat effect removed during one procedure, which greatly simplifies the procedure of InSAR post-processing.

Key words: Interferometric synthetic aperture radar; Backward projection algorithm; Interferogram; Earth-flat effect; Image registration

0 引 言

由于具备全天时、全天候和大场景观测等优势,干涉合成孔径雷达 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 已成为当前提取大面积地形高程的一项重要遥感技术,对地形测绘、自然灾害监测和资源调查等领域意义重大^[1-2]。高精度测量是未来 InSAR 技

术发展的必然趋势,也是当今 InSAR 应用领域的迫切需求。目前,发达国家已研制成功多个高精度星载 InSAR 系统,如日本 ALOS 观测卫星、加拿大 Radarsat 系列雷达卫星,而德国星载 TanDEM-X 干涉系统是利用两星编队飞行进行高精度雷达干涉测量,第一颗 TerraSAR-X 卫星于 2007 年发射升空,第二颗 TanDEM-X 卫星于 2010 年发射升空,两颗卫星有三年工作交叠

期,将获得高程定位精度优于 2m 的全球高精度 DEM 数字高程模型。星载 InSAR 系统具有大区域测绘、动态过程的长期监测等优势,已成为各国卫星雷达系统的发展重点。为了获取高精度地形信息, InSAR 数据处理需实现高精度成像及干涉相位提取。目前 InSAR 成像后处理技术已日臻成熟,如何提高成像中的相位精度成为高精度 InSAR 亟待解决的关键问题。目前星载 InSAR 主要采用频域方法成像,如距离多普勒(RD)算法或变尺度(CS)算法^[3-4],先对各天线独立成像,然后再利用图像配准获取干涉相位,成像和干涉相位提取是前后独立的过程。虽然频域算法计算复杂度小,但在 InSAR 成像中存在以下不足:1)利用场景参考点函数进行成像,在场景非参考点成像时存在参考函数失配,容易引起成像散焦及相位误差;2)基于雷达平台为匀速直线运动的假设前提,若平台非直线非匀速运动时成像参考函数会失配,运动误差难以补偿,导致干涉相位提取精度降低;3)不同天线的成像空间不同,成像后需对各天线 SAR 图像进行图像配准,配准精度不高时也易引入干涉相位误差。因此,对于平台复杂运动情况下 InSAR 成像,需研究更有效的高精度成像及干涉相位提取算法。

后向投影(BP)算法是一种经典的时域成像算法^[5],其主要思想是利用目标场景分辨单元到系统天线之间的距离历史,将对应时延回波信号进行多普勒相位补偿及相干累加,从而恢复出场景分辨单元的目标函数。与频域算法不同,BP 算法不需构造参考函数,故在场景非参考点成像时不会引入失配误差;也不需平台运动为匀速直线,非常适用于非直线、非匀速等复杂运动高精度 SAR 成像。然而,传统 BP 算法在成像过程中补偿了目标时延相位^[5],消除了目标与天线间的斜距相位,故传统 BP 算法对各天线单独成像,不能获取 InSAR 干涉相位。

为了提高复杂运动情况下 InSAR 成像精度,本文结合 InSAR 几何模型和回波信号特征,对 BP 算法进行改进,提出了一种基于同空间后向投影的 InSAR 成像与干涉相位提取方法,将不同天线回波数据投影到相同的地面空间,再构造合理的相位因子进行相干积累成像,不仅实现了复杂运动条件下高精度聚焦,还保留了各天线间的干涉相位。仿真和实测数据结果验证了在复杂

运动情况下本文算法较传统频域算法获得更好的 InSAR 成像结果和干涉相位质量,还证实了该方法可在成像中实现 InSAR 图像配准、去平地效应的一体化处理。

1 InSAR 成像模型

星载 InSAR 成像的典型几何模型如图 1 所示。假设星载 InSAR 采用重复航过模式,场景中某个点目标位置为 $\mathbf{P}_w = [x, y, z]^T$,该点散射系数为 $\sigma(\mathbf{P}_w)$,基线长度为 B ,由基线分开的两条直线为天线的真实运动轨迹,虚线为理想轨迹, $\mathbf{P}_M(n)$ 和 $\mathbf{P}_S(n)$ 分别为主副天线在第 n 个方位时刻的位置,其到点目标 \mathbf{P}_w 的斜距分别记为 $R_M(n, \mathbf{P}_w)$ 和 $R_S(n, \mathbf{P}_w)$ 。

假设雷达发射线性调频(LFM)信号,表达式为

$$s(t) = \exp(j2\pi f_c t + j\pi f_{dr} t^2), |t| \in T/2 \quad (1)$$

式中: f_c 为雷达载频, f_{dr} 为信号调频斜率, T 为脉冲周期,则点目标 \mathbf{P}_w 的回波信号可表示为

$$s(t, n, \mathbf{P}_w) = \sigma(\mathbf{P}_w) \exp(-j2\pi f_c \tau) \cdot \exp(j\pi f_{dr} (t - \tau)^2) \quad (2)$$

式中: $\tau = \frac{R(n, \mathbf{P}_w)}{c}$, c 为空气中光速。

经二维聚焦后,点目标 \mathbf{P}_w 主副天线信号近似为

$$\begin{cases} S_M(\mathbf{P}_w) \approx \gamma_M(\mathbf{P}_w) \exp\left(\frac{-j4\pi R_M(n_0, \mathbf{P}_w)}{\lambda}\right) \\ S_S(\mathbf{P}_w) \approx \gamma_S(\mathbf{P}_w) \exp\left(\frac{-j4\pi R_S(n_0, \mathbf{P}_w)}{\lambda}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\gamma_M(\mathbf{P}_w)$ 和 $\gamma_S(\mathbf{P}_w)$ 分别为目标 \mathbf{P}_w 的主副天线方位-距离模糊函数, n_0 为主副天线距目标 \mathbf{P}_w 最近方位时刻。此时,目标 \mathbf{P}_w 理论干涉相位可表示为

$$\varphi(\mathbf{P}_w) = \angle(S_M(\mathbf{P}_w)S_S^*(\mathbf{P}_w)) = \frac{4\pi\Delta R(n_0, \mathbf{P}_w)}{\lambda} \quad (4)$$

式中: $\Delta R(n_0, \mathbf{P}_w) = R_S(n_0, \mathbf{P}_w) - R_M(n_0, \mathbf{P}_w)$ 为点目标 \mathbf{P}_w 到主副天线的斜距差, $\angle(\cdot)$ 为相位运算符号。获取目标场景所有单元干涉相位 $\varphi(\mathbf{P}_w)$,是成像算法成功应用于 InSAR 成像的关键。

2 后向投影成像原理

BP 算法主要将回波数据逐点投影到成像空间各分辨单元,实现对应回波信号的积累,其算法主要

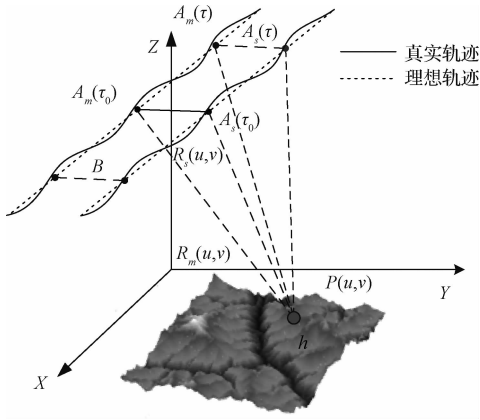


图 1 InSAR 观测几何模型

Fig. 1 The geographic model of InSAR measurement

步骤如下:

步骤 1: 确定成像投影空间, 划分投影空间单元格, 单元格间距应略小于系统理论分辨率;

步骤 2: 回波数据距离压缩与插值, 插值函数可选择频域 sinc 插值^[6], 处理后数据记为 $S_r(r, n)$;

步骤 3: 计算单元格距离历史, 对于投影空间单元格 P'_w , 计算其距离历史 $R(n, P'_w)$;

步骤 4: 计算 P'_w 在第 n 个慢时刻的回波位置

$$I_{n, P'_w} = \left\lfloor \left(\frac{R(n, P'_w)}{c} - T_{\text{Delay}} + T_{\text{Pulse}} \right) \kappa f_s \right\rfloor \quad (5)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示上取整运算符, T_{Delay} 表示接收波门延时, T_{Pulse} 表示发射脉冲持续时间, κ 表示频域插值倍数, f_s 表示采样频率;

步骤 5: 补偿 P'_w 多普勒相位及回波相干积累

$$S(P'_w) = \sum_n S_r(I_{n, P'_w}, n) \exp\left(\frac{j4\pi R(n, P'_w)}{\lambda}\right) \quad (6)$$

步骤 6: 遍历所有投影空间单元格和方位向慢时刻进行上述操作, 即可完成 BP 成像处理。

从上述步骤可知, 与 RD 等频域算法相比, BP 算法实现简单, 不存在距离近似误差, 适用于任意运动轨迹及工作模式 SAR 成像处理, 已被成功用于复杂运动情况下单基和双基 SAR 高精度成像^[7-8]。但由式(6)可知, BP 算法补偿了回波 $S_r(r, n)$ 中延时相位, 故未保留斜距相位 $\exp\left(\frac{-j4\pi R(n, P'_w)}{\lambda}\right)$ 。

因此, 利用传统 BP 算法进行 InSAR 成像无法获得干涉相位, 导致 BP 算法优势无法在 InSAR 成像发挥。如何利用 BP 算法获取 InSAR 干涉相位, 需结

合 BP 算法原理和 InSAR 成像模型进行研究。

3 同空间后向投影 InSAR 成像

3.1 算法成像原理

根据式(2), 距离压缩后点目标 P_w 信号可表示为

$$\begin{cases} S_{M_r}(r, n, P_w) = \gamma_{M_r}(R_M(n, P_w)) \cdot \\ \quad \exp\left(\frac{-j4\pi R_M(n, P_w)}{\lambda}\right) \\ S_{S_r}(r, n, P_w) = \gamma_{S_r}(R_S(n, P_w)) \cdot \\ \quad \exp\left(\frac{-j4\pi R_S(n, P_w)}{\lambda}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\gamma_{M_r}(R_M(n, P_w))$ 和 $\gamma_{S_r}(R_S(n, P_w))$ 为 P_w 分别主、副天线的距离模糊函数。为了获取 BP 算法成像干涉相位, 对式(7)中数据进行多普勒相位补偿时, 必须要保留主副天线到目标的斜距差 $\Delta R(n, P_w)$ 。

为了得到星载 InSAR 干涉相位, 本文将主副天线数据投影到同一个地平面空间成像, 并对 BP 算法相位补偿因子进行修正, 提出了两种 BP 算法, 分别称为 BP1 和 BP2 算法。两种算法步骤 1 至 4 和第 2 节传统 BP 算法一致, 仅在步骤 5 补偿多普勒相位时不同。BP1 算法在主副天线相干积累时, 同时补偿主天线多普勒相位函数; 而 BP2 算法在主副天线相干积累时, 除了补偿主天线多普勒相位函数, 还补偿了地平面投影点到各自天线的斜距信息。

假设点目标 P_w 在地平面投影点为 P'_w , 对于式(7), BP1 算法同时补偿主天线多普勒相位函数, 有

$$\begin{cases} S_M(P'_w) = \sum_n S_{M_r}(r, n, P_w) \exp\left(\frac{j4\pi R_M(n, P'_w)}{\lambda}\right) \\ S_S(P'_w) = \sum_n S_{S_r}(r, n, P_w) \exp\left(\frac{j4\pi R_M(n, P'_w)}{\lambda}\right) \end{cases} \quad (8)$$

则主副天线获得的点目标 P'_w 干涉相位为

$$\begin{aligned} \varphi_{r1}(P'_w) &= \angle(S_M(P'_w)S_S^*(P'_w)) = \\ &= \angle\left(\sum_n \exp\left(j4\pi \frac{\Delta R(n, P_w)}{\lambda}\right)\right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中斜距差 $\Delta R(n, P_w) = R_S(n, P_w) - R_M(n, P_w)$ 。

对于远场条件 SAR 成像, 合成孔径长度通常远小于平台天线到场景的斜距, 即 $L_a \ll R(n, P_w)$ 。对于合成孔径时间内的任意方位时刻 n , 则有

$$\Delta R(n, P_w) \approx B \sin(\theta_{P_w} - \alpha) + \frac{B^2}{2R_M(n, P_w)} \quad (10)$$

而对于星载 InSAR 系统, $B \ll R_M(n, \mathbf{P}_w)$, 则有

$$\Delta R(n, \mathbf{P}_w) \approx \Delta R(n_0, \mathbf{P}_w) \approx B \sin(\theta_{P_w} - \alpha) \quad (11)$$

因此, BP1 算法获得的干涉相位 $\varphi_T(\mathbf{P}'_w)$ 可表示为

$$\varphi_{T1}(\mathbf{P}'_w) \approx \angle \left(n \exp \left(j4\pi \frac{\Delta R(n_0, \mathbf{P}_w)}{\lambda} \right) \right) \approx \frac{4\pi B \sin(\theta_{P_w} - \alpha)}{\lambda} \quad (12)$$

此时, BP1 算法不仅保持了传统 BP 算法成像性能, 实现主副天线数据良好聚焦, 还保留了主副天线到场景目标的斜距差相位, 使得地平面投影点目标 \mathbf{P}'_w 的干涉相位 $\varphi_T(\mathbf{P}'_w)$ 近似等于式(4)中 InSAR 观测场景点目标 \mathbf{P}_w 的理论干涉相位 $\varphi(\mathbf{P}_w)$ 。

对于式(7), BP2 算法除了补偿主天线多普勒相位函数, 还补偿了投影点 \mathbf{P}'_w 到各天线斜距信息

$$\begin{cases} S_M(\mathbf{P}'_w) = \sum_n S_{M_r}(n, \mathbf{P}_w) \cdot \exp \left(j4\pi \frac{R_M(n, \mathbf{P}'_w) - R_M(n_0, \mathbf{P}'_w)}{\lambda} \right) \\ S_S(\mathbf{P}'_w) = \sum_n S_{S_r}(n, \mathbf{P}_w) \cdot \exp \left(j4\pi \frac{R_S(n, \mathbf{P}'_w) - R_S(n_0, \mathbf{P}'_w)}{\lambda} \right) \end{cases} \quad (13)$$

根据式(10)和(11), BP2 算法的干涉相位 $\varphi_T(\mathbf{P}'_w)$ 为

$$\begin{aligned} \varphi_{T2}(\mathbf{P}'_w) &= \angle (S_M(\mathbf{P}'_w) S_S^*(\mathbf{P}'_w)) = \\ &\angle \left(\sum_n \exp \left(j4\pi \frac{\Delta R(n, \mathbf{P}_w) - \Delta R(n_0, \mathbf{P}'_w)}{\lambda} \right) \right) \approx \\ &\angle \left(\exp \left(j4\pi \frac{\Delta R(n_0, \mathbf{P}_w) - \Delta R(n_0, \mathbf{P}'_w)}{\lambda} \right) \right) = \\ &\varphi_{T1}(\mathbf{P}'_w) - 4\pi \frac{\Delta R(n_0, \mathbf{P}'_w)}{\lambda} \end{aligned} \quad (14)$$

由式(13)和(14)可得, BP2 算法成像聚焦性能与 BP1 算法相同, 但 BP2 算法不仅得到目标 \mathbf{P}_w 的斜距差相位, 还获得了地平面投影点 \mathbf{P}'_w 的斜距差相位。

从 BP1 和 BP2 算法原理可知, 理论上两种算法在任意平台运动情况下都具有良好的成像和保相精度, 能够实现成像空间高精度成像和干涉相位提取。

3.2 同空间配准

观测场景点目标 \mathbf{P}_w 到地平面的投影关系如图 2 所示, \mathbf{P}_w 点投影到地平面单元格 \mathbf{P}'_w , 则图像配准与地面投影点距离向位置差 $\Delta x_M(\mathbf{P}'_w)$ 有关

$$\begin{aligned} \Delta x_M(\mathbf{P}'_w) &= x_M(\mathbf{P}'_w) - x_S(\mathbf{P}'_w) = \\ &\sqrt{R_M^2(n, \mathbf{P}'_w) - z^2(\mathbf{P}_M)} - \sqrt{R_S^2(n, \mathbf{P}'_w) - z^2(\mathbf{P}_S)} - \\ &(x_M(\mathbf{P}_w) - x_S(\mathbf{P}_w)) \end{aligned} \quad (15)$$

当 $\Delta x_M(\mathbf{P}'_w)$ 变化小于一个距离向分辨单元大小时, 则主副天线图像配准。从图 2 可知, 固定平台系统参数, 影响主副图像配准效果主要有两个因素: 场景散射点相对于地平面的高度及成像空间距离向划分单元格大小。若点目标 \mathbf{P}_w 高度增大及距离向单元格变小, 可使得 \mathbf{P}_w 点投影到主副天线成像空间的不同像素, 导致主副天线图像失配。为了利用本文算法实现成像配准一体化, 需分析场景目标高度和分辨单元大小对图像偏移的影响。

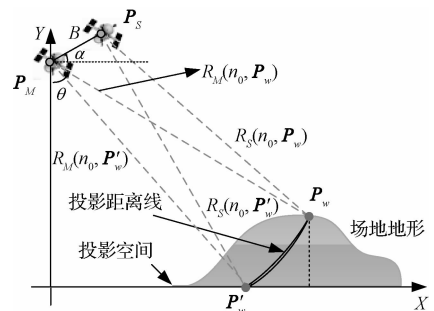


图 2 BP 成像空间投影示意图

Fig. 2 The sketch of BP imaging space projection

假设星载 InSAR 基线 B 分别为 25 m, 50 m 和 75 m, 雷达入射角为 45° , 图 3(a) 给出了卫星高度为 400 km 时场景中心的主副天线地面投影点距离向位置差与场景中心点高度的变化曲线, 图 3(b) 给出了场景中心点高度为 4 km 时场景中心的主副天线地面投影点距离向位置差与平台高度的变化曲线。从图 4 可知, 基线越长和场景目标越高, 投影点地面距离差越大, 而星载平台越高, 投影点地面距离差越小; 在基线长度小于 75 m 条件下, 场景中心点高度从 0 变至 5 km 时, 主副天线地面投影点距离向位置差只变化 0.8622 m, 若距离向分辨单元小于 1.7 m 时, 则利用本文算法成像得到的主副天线图像具有像素级配准。因此, 当场景高度变化不大时, 通过合理选择投影空间距离向分辨单元大小, 可保证本文算法星载 InSAR 成像具有图像配准性能。

3.3 平地效应去除

平地效应是由 InSAR 侧视成像时, 水平地面上同一高度不同距离位置目标产生的干涉相位。因平地效应会导致干涉相位条纹过密, 增大后续

相位解缠难度,传统处理算法通常在干涉相位生成后,再采用轨道参数等方法去除平地效应,但该过程易引入估计误差,同时增加 InSAR 数据处理的复杂度。

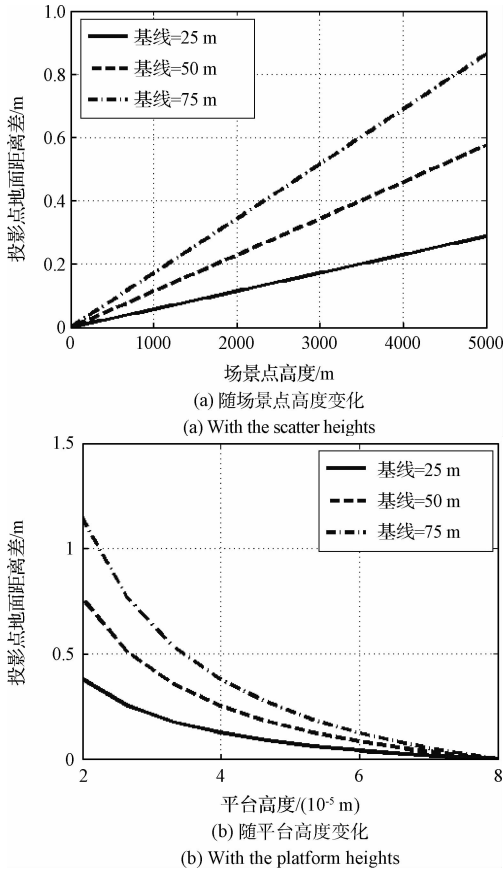


图3 投影点地面距离差的变化曲线

Fig. 3 The range difference of the ground-projection point

由式(14)可知,BP2算法干涉相位 $\varphi_{T2}(\mathbf{P}'_w)$ 包含了两部分相位信息:第1项为场景点目标 \mathbf{P}_w 对应的斜距差相位 $\varphi_{T1}(\mathbf{P}'_w)$,第2项为地平面投影点 \mathbf{P}'_w 对应的斜距差相位 $4\pi\Delta R(n_0, \mathbf{P}'_w)/\lambda$ 。根据式(11),得到

$$\Delta R(n_0, \mathbf{P}'_w) \approx B \sin(\theta_{P_w} - \Delta\theta_{P_w} - \alpha) \quad (16)$$

式中 $\Delta\theta_{P_w}$ 为主天线在场景点 \mathbf{P}_w 和投影点 \mathbf{P}'_w 的视角变化量,则BP2算法干涉相位 $\varphi_{T2}(\mathbf{P}'_w)$ 可表示为 $\varphi_{T2}(\mathbf{P}'_w) \approx$

$$4\pi B \frac{\sin(\theta_{P_w} - \alpha) - \sin(\theta_{P_w} - \Delta\theta_{P_w} - \alpha)}{\lambda} \approx \frac{-4\pi B \cos(\theta_{P_w} - \alpha) \Delta\theta_{P_w}}{\lambda} \quad (17)$$

因 $\Delta\theta_{P_w}$ 很小,则有

$$\Delta\theta_{P_w} \approx \sin(\Delta\theta_{P_w}) = \frac{z(\mathbf{P}_w)}{R(n_0, \mathbf{P}'_w) \sin(\theta_{P_w})} \quad (18)$$

由式(17)和(18)可得

$$\varphi_{T2}(\mathbf{P}'_w) \approx -\frac{4\pi B \sin(\theta_{P_w} - \alpha) z(\mathbf{P}_w)}{\lambda R(n_0, \mathbf{P}'_w) \sin(\theta_{P_w})} \quad (19)$$

从式(19)可知, $\varphi_{T2}(\mathbf{P}'_w)$ 只与场景点 \mathbf{P}_w 高度有关,即 $\varphi_{T2}(\mathbf{P}'_w)$ 去除了点 \mathbf{P}_w 的平地相位。

因此,BP2算法在成像过程中去除了平地效应,实现InSAR成像、配准和去平地效应一体化处理。

3.4 算法运算量

对于距离向采样点数为 N_R ,方位向采样点数为 N_A 的单天线SAR原始回波数据,RD和CS等频域算法,所需计算量约为 $O(N_R N_A (\log_2 N_A + \log_2 N_R))$;而对于相同大小成像场景,BP算法所需计算量约为 $O(N_R N_A (N_A + \log_2 N_R))$,因此BP算法成像处理时间远大于频域算法。

然而BP算法中场景各分辨单元可独立处理,因此非常利于计算机并行化实现。随着近几年并行化技术快速发展,如采用GPU和CUDA并行处理技术,已经可将BP运算效率提高1个数量级以上^[9]。

4 数据成像结果

4.1 仿真数据结果

为了校验本文算法的InSAR成像性能,本节利用面目标仿真进行分析。主要仿真参数为:星载雷达载频 $f_c = 1.38$ GHz,发射信号带宽 $B_r = 30$ MHz,天线方位真实孔径长度 $D = 10$ m,卫星平台高度 $H = 600$ km,平台到场景中心斜距 $R_0 = 1000$ km,基线水平放置且长度 $B = 100$ m,卫星平台做非匀速直线运动,但速度存在均值为100 m/s,方差为1的高斯随机误差。仿真场景为圆锥曲面,如图4(a)所示,场景大小为2000 m × 2000 m,锥心高度为800 m。在回波生成中加入信噪比SNR = 10 dB的复高斯白噪声。

分别利用RD算法和本文BP算法对主副天线圆锥场景仿真数据进行成像,得到的干涉相位如图4(b)~(d)所示,其中RD算法主副天线SAR图像经过配准处理,本文算法主副天线图像未经过配准处理,图4(c)为本文BP1算法得到的干涉相位,图4(d)为本文BP2算法得到的干涉相位。从图4可看出,本文BP算法得到的干涉相位噪声点数和相位条纹边缘明显优于传统RD频域算法;另外,BP1

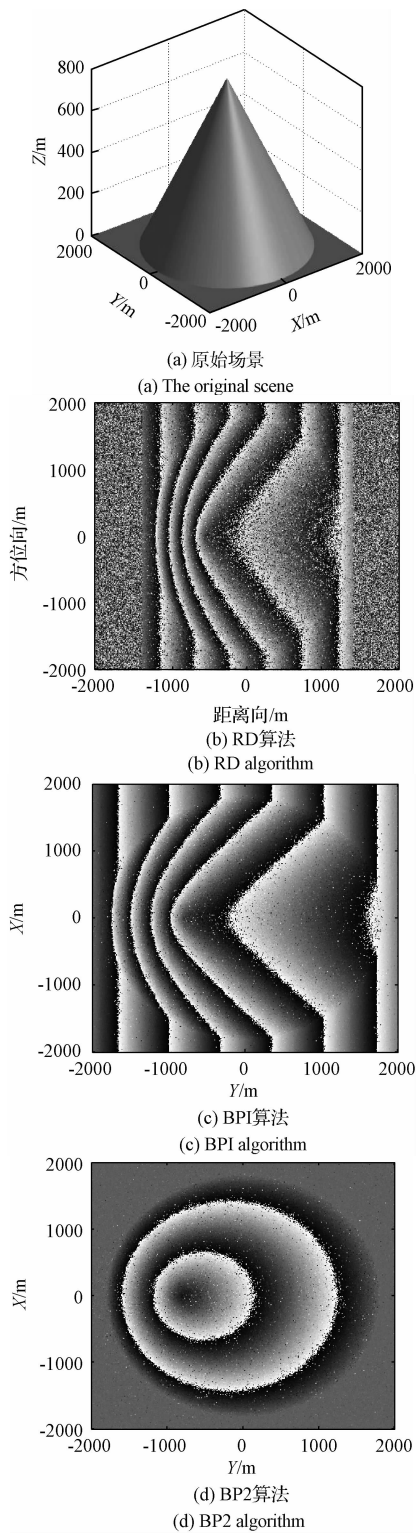


图 4 仿真圆锥场景中不同算法获得的干涉相位
Fig. 4 The interferogram of different algorithms
for the simulated cone scene

算法中主副天线成像均补偿主天线多普勒相位函数,所得干涉相位与 RD 算法相似,存在平地相位条

纹;BP2 算法除了补偿主天线的多普勒相位函数,还补偿了地平面投影点到各自天线的斜距信息,干涉相位中平地效应被去除。仿真数据结果说明了本文两种 BP 算法可以提高非匀速运动条件下 InSAR 成像干涉相位质量,且 BP2 算法可去除平地效应。

表 1 仿真圆锥场景 InSAR 成像评价

Table 1 InSAR imaging evaluation for the simulated cone

评价准则	成像算法		
	RD	BP1	BP2
像素偏移 (方位,距离)	(0, -5)	(0, 0)	(0, 0)
相位残差点比	0.0332	0.0068	0.0068
相关系数	0.9786	0.9915	0.9915
信噪比	0.4814	0.4931	0.4931
成像时间/s	6.3475	1878.4	1877.8

为了定量分析 RD 和本文 BP 算法在仿真圆锥场景 InSAR 成像性能,本文利用主副 SAR 图像偏移量、干涉相位残差点比例、相关系数、信噪比及成像时间指标^[10]对成像算法结果进行评估,其中相关系数:

$$\gamma(S_M, S_S) = \frac{|E(S_M S_S^*)|}{\sqrt{E(|S_M|^2)E(|S_S|^2)}} \quad (20)$$

信噪比:

$$SMR = \frac{\gamma(S_M, S_M)}{\gamma(S_M, S_M) + 1} \quad (21)$$

在 Matlab 软件及 CoreI7 - CPU、8G 内存计算机环境下,评估结果如表 1 所示, RD 算法主副天线 SAR 图像在距离向存在 3 个像素偏移,而本文两种 BP 算法主副天线 SAR 图像不存在像素偏移,验证了本文 BP 算法可实现 InSAR 成像配准一体化;对于干涉相位残差点比, BP 算法优于 RD 算法,并且较 RD 算法降低一个数量级;对于主副天线 SAR 图像的相关系数和相位信噪比,本文算法也明显优于 RD 算法;对于成像时间,因本文算法在时域逐点处理,成像时间远大于 RD 算法。表 1 结果说明了本文算法较传统 RD 算法运算量大,但提高了 InSAR 成像和干涉相位提取质量,具有图像配准性能,验证了本文算法在 InSAR 数据成像的有效性。

4.2 实测数据结果

本节利用 Ka 波段 InSAR 数据进行成像分析,该系统采用一发双收天线模式,距离/方位理论分辨率分别为 0.15 m 和 0.09 m,基线长度 $B = 0.3$ m。

主副天线做非直线非匀速运动, 轨迹如图 5 所示。实验场景光学图如图 6(a) 所示, 场景地势比较平坦, 场景目标主要由农田、道路和河流等组成。

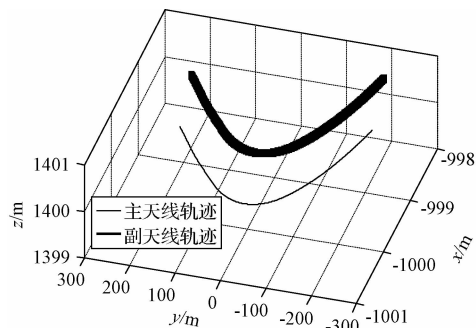


图 5 主副天线运动轨迹

Fig. 5 The trajectory of the master and slave antennas

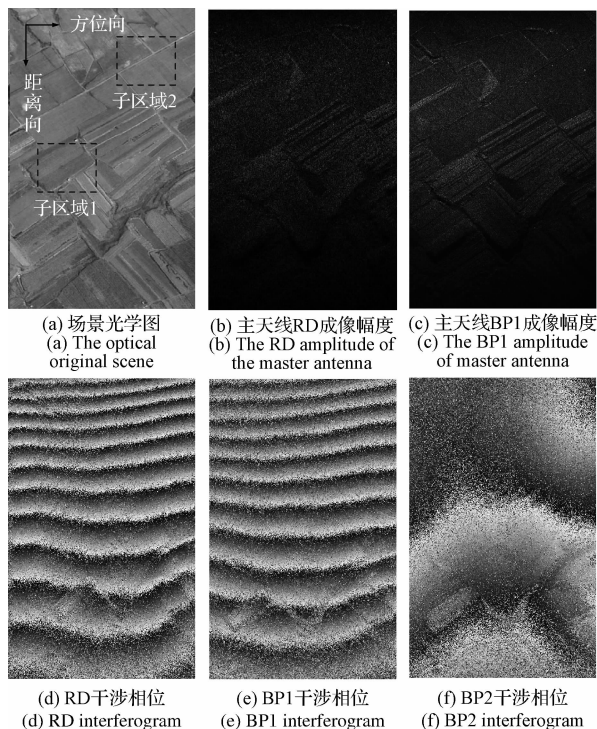


图 6 毫米波机载 InSAR 实测数据成像结果

Fig. 6 The results of millimeter-wave airborne InSAR real data

图 6(b) 为主天线 RD 成像幅度图, 图 6(c) 为主天线利用本文 BP1 算法成像幅度图, 其中 RD 算法利用匀速直线轨迹进行成像, 两种算法都未进行自聚焦运动补偿。对比图 6(a) 场景光学图像, RD 算法结果存在较严重的方位向散焦, 而本文 BP1 算法结果良好地实现了农田和道路等目标的聚焦。

图 6(d) 为 RD 算法得到的干涉相位, 图 6(e) 为 BP1 算法得到的干涉相位, 图 6(f) 为 BP2 算法得到的干涉相位。从图 6 可得, BP1 和 BP2 算法在成像

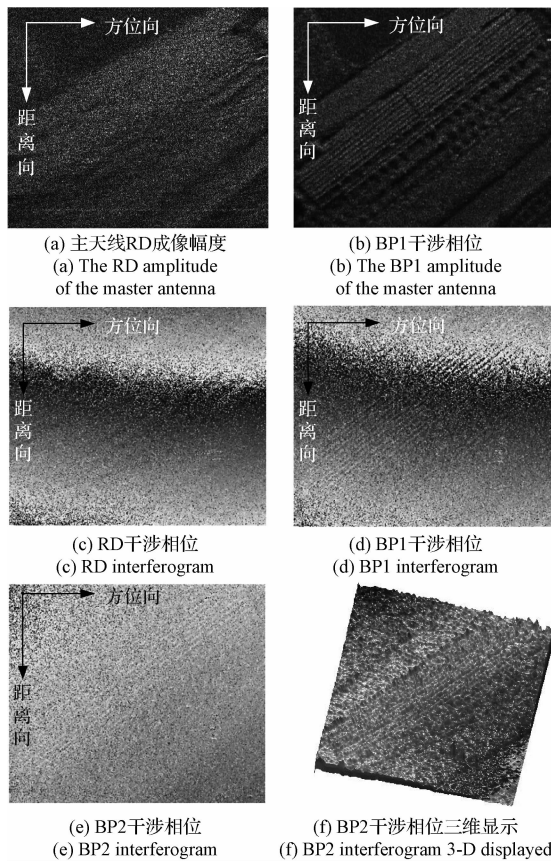


图 7 场景子区域成像结果

Fig. 7 The results of sub-region for the InSAR real data

中即得到场景干涉相位, 而无需对主副天线 SAR 图像进行配准。另外, 利用 BP1 算法成像时, 图 6(e) 在距离向上存在多个条纹的平地相位, 在 InSAR 相位后处理时需要去除; 而利用 BP2 算法成像时, 平地相位条纹被去除, 图 6(f) 干涉相位更加清晰地反映了观测场景地形高程的变化。实测数据结果验证了本文两种 BP 算法在 InSAR 成像的有效性。

在图 6 中选择两小块子区域进行分析, 两块子区域大小相同, 选择子区域 1 如图 6(a) 中虚线矩形窗 1 所示, 子区域 1 场景中包含几块平行分布的田埂。图 7(a) ~ (b) 分别为 RD 和本文 BP1 算法主天线成像得到的幅度图, 可以看出 BP1 算法结果不同田埂清晰可辨, 聚焦效果明显优于传统 RD 算法。图 7(c) 为 RD 算法得到的干涉相位, 图 7(d) ~ (e) 分别为 BP1 和 BP2 算法成像时得到的干涉相位, 显然, 图 7(d) 中 BP1 算法结果存在平地相位, 图 7(e) 中 BP2 算法去除了平地相位, 图 7(f) 为图 7(e) 干涉相位滤波处理后得到的干涉相位三维图。从图 7 干涉相位图可知, 本文算法成像得到的田埂平行干涉相位条纹清晰可辨, 真实反映了田埂地形的高程

起伏细节特征,成像和干涉相位质量都优于传统 RD 频域算法。

为了进一步分析本文算法在实测数据成像的性能,利用主副图像偏移量、干涉相位残差点比、相关系数、相位信噪比和成像时间对图 7 中子块场景 1 和 2 的成像进行评估,结果如表 2 所示。RD 算法在子区域 1 中主副天线 SAR 图像方位/距离向存在 $(-1, 2)$ 个像素偏移,在子区域 2 中方位/距离向存在 $(-1, 3)$ 个像素偏移,而 BP 算法在两个子区域中主副天线 SAR 图像不存在像素偏移,虽然本文 BP 算法牺牲了运算量,但对于干涉相位残差点比、相关系数和信噪比,BP 算法结果也略优于 RD 算法,也验证了本文算法在 InSAR 数据成像的有效性。

表 2 子块场景中 InSAR 成像评价

Tabel 2 InSAR imaging evaluation for the sub-region

场景	评价准则	成像算法		
		RD	BP1	BP 2
子 区 域 1	像素偏移 (方位,距离)	$(-1, 2)$	$(0, 0)$	$(0, 0)$
	相位残差点比	0.0590	0.0578	0.0578
	相关系数	0.9328	0.9383	0.9383
	成像时间/s	12.71	17982	17987
子 区 域 2	像素偏移 (方位,距离)	$(-1, 3)$	$(0, 0)$	$(0, 0)$
	相位残差点比	0.0422	0.0415	0.0415
	相关系数	0.9563	0.9597	0.9597
	成像时间/s	12.74	17984	17986

5 结 论

针对复杂运动条件下高分辨 InSAR 成像要求,本文结合 InSAR 成像模型及后向投影算法优势,提出了一种基于同成像空间投影的 InSAR 成像及干涉相位提取方法,分析了该算法的干涉相位提取、图像配准和平地效应去除性能,并利用仿真数据和毫米波机载实测 InSAR 数据实验结果,验证了本文算法的有效性。理论分析和实验结果说明,虽然本文算法较传统频域算法运算量大,但具有以下优点:

1) 算法聚焦效果好、相位精度高,对比 RD 频域算法,该算法对场景非参考点及非直线非匀速平台轨迹可实现良好聚焦,克服了频域算法中多普勒频域失配造成的相位误差,干涉相位精度更高。

2) 成像空间灵活,可将 InSAR 各天线数据投影到相同成像空间,实现不同天线图像像素级别配准。

3) InSAR 成像、配准和去平地效应一体化,利用地平面作为投影空间及合理补偿多普勒相位,该算法在成像中即可去除平地相位,简化成像后处理流程。

参 考 文 献

- [1] Vasco D W, Rutqvist J, Ferretti A, et al. Monitoring deformation at the Geysers Geothermal field, California using C-band and X-band interferometric synthetic aperture radar [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(11): 2567–2572.
- [2] 于祥祚, 种劲松, 洪文, 等. 速度聚束调制对顺轨干涉 SAR 浅海地形成像的影响研究 [J]. *宇航学报*, 2012, 33(7): 942–948. [Yu Xiang-zhen, Chong Jin-song, Hong Wen, et al. Study on influence of velocity bunching modulation on shallow sea topography imaging by ATI-SAR [J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(7): 942–948.]
- [3] Neo Y L, Wong F H, Cumming I G. Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range Doppler algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 14–21.
- [4] Curlander J C, McDonough R N. *Synthetic aperture radar* [M]. New York: Wiley, 1991.
- [5] Demanet L, Ferrara M, Maxwell N, et al. A butterfly algorithm for synthetic aperture radar imaging [J]. *SIAM Journal of Imaging Sciences*, 2012, 5(1): 203–243.
- [6] Jun S, Zhang X, Yang J. Principle and methods on bistatic SAR signal processing via time correlation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3163–3178.
- [7] Yarman C E, Yazici B, Cheney M. Bistatic synthetic aperture radar imaging for arbitrary flight trajectories [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(1): 84–93.
- [8] Wei S J, Zhang X L, Shi J, et al. Sparse array microwave 3-D imaging: compressed sensing recovery and experimental study [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, 135:161–181.
- [9] Capozzoli A, Curcio C, Liseno A. Fast GPU-based interpolation for SAR backprojection [J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2013, 133:259–283.
- [10] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2002:37–66.

作者简介:

韦顺军(1983–),男,博士,讲师,主要从事 SAR 成像及信号处理研究。

通信地址:成都高新西区西源大道 2006 号(611731)

电话:(028)61831500

E-mail: weishunjun @ uesc.edu.cn