

基于曲面投影的毫米波 InSAR 数据成像方法

韦顺军*^① 师君^① 张晓玲^① 陈刚^②

^①(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

^②(西安测绘研究所 西安 710054)

摘要: 与其它波段相比,毫米波系统具有体积小、重量轻、分辨率高等优点,成为近几年 InSAR 技术的研究热点。但因其波长短,毫米波 InSAR 对平台运动轨迹测量精度要求更高,非理想运动情况下传统成像方法数据处理及干涉相位提取困难,另外传统方法基于平面投影成像,在地形陡变时干涉相位缠绕和目标几何畸变较严重。为了解决传统方法在毫米波 InSAR 成像的以上不足,该文提出了一种基于曲面投影的毫米波 InSAR 成像方法,将不同通道回波数据投影到相同地形高程曲面上进行成像及干涉相位提取,并推导了曲面下地形高程与干涉相位的关系。仿真和实测数据结果验证了该文方法的有效性,结果显示该方法在平台非理想运动下较传统算法获得更好的 InSAR 成像和干涉相位质量,且减小了地形高程起伏引起的几何畸变及干涉相位缠绕,更有利于毫米波 InSAR 图像地形特征描述及高程提取。

关键词: 干涉 SAR (InSAR); 毫米波; 曲面投影; 干涉相位; 高度反演

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2015)01-0049-11

DOI: 10.12000/JR14137

引用格式: 韦顺军,师君,张晓玲,等. 基于曲面投影的毫米波 InSAR 数据成像方法[J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 49-59. <http://dx.doi.org/10.12000/JR14137>.

Reference format: Wei Shun-jun, Shi Jun, Zhang Xiao-ling, *et al.* Millimeter-wave interferometric synthetic aperture radar data imaging based on terrain surface projection[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(1): 49-59. <http://dx.doi.org/10.12000/JR14137>.

Millimeter-wave Interferometric Synthetic Aperture Radar Data Imaging Based on Terrain Surface Projection

Wei Shun-jun^① Shi Jun^① Zhang Xiao-ling^① Chen Gang^②

^①(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

^②(Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China)

Abstract: Millimeter-wave Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) has smaller size, lower weight, and higher resolution compared with other bands. Thus, it has become a hot research topic. However, owing to its shorter wavelength, millimeter-wave InSAR data processing requires high-precision measurements of platform motion. For nonideal trajectories, traditional methods face difficulties in echo imaging and interferogram extraction. In addition, existing methods mainly produce SAR images based on plane projection. When the terrain changes abruptly, these methods may cause strong interferometric phase unwrapping and geometric distortion in SAR images. To overcome the abovementioned disadvantages of conventional methods in millimeter-wave InSAR imaging, an approach based on terrain surface projection is proposed. The echoes of different antennas are projected on the same terrain surface space for data imaging and interferogram extraction. In addition, the relation between terrain elevation and interferometric phase is derived. Simulations and experimental results verify the effectiveness of the proposed method; furthermore, the proposed approach improves the precision of interferometric phase extraction in complex motion conditions, while minimizing geometric distortion and phase wrapping in rough terrain, which is more conducive to terrain description and elevation inversion.

Key words: InSAR; Millimeter-wave; Surface projection; Interferometric phase; Elevation inversion

2014-11-20 收到, 2015-02-05 改回

国家自然科学基金(61101170), 高分专项(GFZX0403060201)和高分专项青年创新基金(GFZX04060103-5-25)资助课题

*通信作者: 韦顺军 weishunjun@uestc.edu.cn

1 引言

由于波长较短,毫米波对地面目标穿透能力远小于厘米波,特别适合于提取观测对象的表面信息,有利于形成观测对象的高精度数字表面模型,故与分米波、厘米波相比,在相同干涉基线长度下毫米波 InSAR 更易于实现超高分辨率成像及高精度高程测量,且毫米波系统因其体积小重量轻,在小型及有限负荷平台上(如无人机等)更具优势。因此,毫米波 InSAR 技术及其应用已成为近年 SAR 技术的研究热点,国内外也纷纷开展了毫米波 InSAR 系统研制^[1-10]。目前国外机载毫米波 InSAR 系统研究主要有美国 Sandia 实验室和德国 FGAN 研究所。美国 Sandia 实验室从 1996 年起已相继研发多款高精度机载干涉毫米波 SAR 成像系统,如 Twin-Otter 干涉 SAR 系统,其工作在 Ka, Ku 等波段,高程精度已经达到 0.5 m^[7]。2004 年以来,德国 FGAN FHR 利用研制的高分辨毫米波 SAR 系统(MEMPHIS 系统,该系统同时工作在 35 GHz 和 94 GHz),采用多基线实现干涉测量,提供的高程精度可达到 0.2 m^[9,10]。在国内,2011 年中国科学院电子学研究所成功验证了我国第 1 部机载毫米波三基线 InSAR 原理样机,在 3 km 航行高度上实现了地面成像分辨率优于 0.5 m 及高程测量精度优于 1 m 的成像结果^[1,5]。可以预见,随着雷达硬件水平和毫米波 SAR 技术的不断提高,不久的将来,会有更多的毫米波 InSAR 系统会投入到实际应用中。

目前,毫米波 InSAR 成像主要采用经典频域成像算法,如 RD, CS 和 ω K 算法等^[8],在各个天线对应的斜距平面(也称为方位-距离平面)上投影成像。虽然频域成像算法运算效率高,但均基于 SAR 多普勒质心及多普勒斜率模型,当平台运动轨迹较为复杂时在毫米波 InSAR 成像会有以下不足:(1)基于场景参考点函数进行成像,在场景非参考点成像时存在函数失配,容易引起成像散焦及相位误差;(2)因风场、湍流等因素影响,平台运动轨迹较理想轨迹可能存在较大的偏差,此时成像处理复杂,运动误差难以精确估计与校正,容易导致干涉相位提取精度降低;(3)数据投影于各天线各自的斜距平面成像,起伏地形的顶底倒置、掩叠等畸变严重,几何校正困难。与频域成像算法相比,后向投影(BP)算法采用逐点匹配及相干积累的处理方法,易于并行化处理,可实现运动测量数据(IMU\GPS 等)与成像处理的充分结合,尤其适合于复杂运动情况下毫米波 SAR 成像处理^[11]。文献[12]提出了基

于 BP 处理的 InSAR 成像方法,该方法结合 IMU\GPS 等轨迹精确测量数据,在 InSAR 平台运动轨迹跳动情况仍然可以良好实现 InSAR 聚焦成像和相位提取。文献[7]分析了时变基线对机载 InSAR 数据处理的影响,提出了基于 BP 算法的时变基线 InSAR 数据处理方法。与 RD 和 CS 等频域算法相比,BP 算法处理过程不存在目标和雷达的斜距近似误差,在非理想运动条件下可提高干涉相位提取精度。然而,目前 BP 算法是将 InSAR 回波数据投影到平面空间(斜距平面或地平面等)进行成像处理,故其相位分布仍然与传统频域算法相似,在地形起伏剧烈时干涉相位条纹过密,不利于后期干涉相位解缠。另外,由于毫米波 SAR 分辨率高、采样单元小,相同地形起伏引起的几何畸变在毫米波 SAR 图像中对应的分辨单元更多,不利于后期几何畸变校正和目标特征提取。

为了克服传统平面投影算法在毫米波 InSAR 起伏地形成像带来的相位条纹过密、几何畸变等问题,本文提出了一种基于曲面投影的毫米波 InSAR 成像方法,将毫米波 SAR 主副数据投影到相同的地形曲面空间进行成像,推导了曲面投影时地形相对高程与干涉相位的数学关系,然后在未知地形高程情况下利用迭代处理方法,将 InSAR 数据投影到估计的高程曲面以逐次逼近真实的地形高程,最终可在毫米波 InSAR 数据成像中同时实现地形高度反演。文章主要结构如下:第 2 节简单介绍了 InSAR 成像模型,阐述了传统平面成像投影算法存在的问题;第 3 节推导了曲面下干涉相位与地形高度的关系,然后给出了曲面投影成像方法的基本步骤;第 4 节结合毫米波 InSAR 仿真以及实测数据,分析曲面投影成像算法的性能,验证了算法的有效性;第 5 节给出了本文算法的主要结论。

2 InSAR 成像原理

2.1 InSAR 成像模型

InSAR 成像的典型几何模型如图 1 所示。假设 InSAR 主副天线采用单发单收模式,场景中某个散射点位置为 $\mathbf{P}_w = [x, y, z]^T$, 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主副天线真实的运动轨迹,虚线为主副天线理想的运动轨迹, $\mathbf{P}_M(n)$ 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 $R_M(n, \mathbf{P}_w) = \|\mathbf{P}_w - \mathbf{P}_M(n)\|_2$ 和 $R_S(n, \mathbf{P}_w) = \|\mathbf{P}_w - \mathbf{P}_S(n)\|_2$, 其中 $\|\cdot\|_2$ 表示向量 2 范数运算符。

假设 2 维成像聚焦后散射点 \mathbf{P}_w 的主副天线信号近似为:

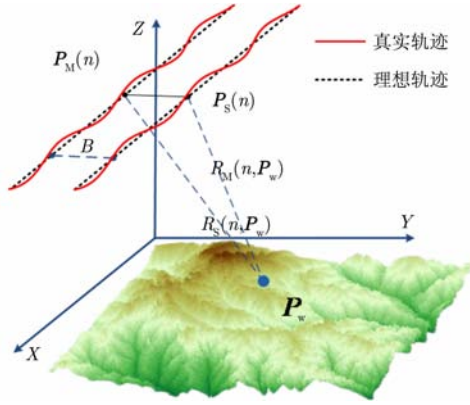


图 1 InSAR 观测几何模型

Fig. 1 The geographic model of InSAR measurement

$$\left. \begin{aligned} S_M(\mathbf{P}_w) &\approx \gamma_{M\text{-ar}}(\mathbf{P}_w) \exp(-j\phi_M(\mathbf{P}_w)) \\ S_S(\mathbf{P}_w) &\approx \gamma_{S\text{-ar}}(\mathbf{P}_w) \exp(-j\phi_S(\mathbf{P}_w)) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $\gamma_{M\text{-ar}}(\mathbf{P}_w)$, $\gamma_{S\text{-ar}}(\mathbf{P}_w)$ 分别为目标 \mathbf{P}_w 对应的 InSAR 主副天线方位-距离模糊函数, $\phi_M(\mathbf{P}_w)$ 和 $\phi_S(\mathbf{P}_w)$ 分别为目标 \mathbf{P}_w 在主副天线图像对应的相位。此时, 散射点 \mathbf{P}_w 的干涉相位可表示为:

$$\phi(\mathbf{P}_w) = \angle(S_M(\mathbf{P}_w)S_S^*(\mathbf{P}_w)) = \phi_M(\mathbf{P}_w) - \phi_S(\mathbf{P}_w) \quad (2)$$

其中 $\angle(\cdot)$ 为相位运算符, 上标“*”表示共轭运算符。如何提取干涉相位 $\phi(\mathbf{P}_w)$, 并建立干涉相位 $\phi(\mathbf{P}_w)$ 与散射点 \mathbf{P}_w 高度 z 的关系, 是所有 InSAR 成像算法成功反演地形高程的核心问题。

目前, InSAR 成像主要采用经典频域成像算法, 如 RD, CS 和 ω K 算法等, 将 InSAR 主副天线的回波数据投影到各天线对应的斜距平面上投影成像, 然后利用主副天线与目标的三角几何关系和干涉相位反演出地形高程。基于经典频域成像算法的 InSAR 地形反演基本步骤包括: 数据成像、干涉相位提取、滤波、相位解缠、高程估计和校正等^[13]。但是如前文所述, 频域成像算法在高精度毫米波 InSAR 成像时仍然存在诸多问题亟待解决。

2.2 平面投影成像

BP 算法是一种基于时域相干处理的成像算法, 其基本思想是利用投影成像区域内分辨单元到 SAR 天线平台之间的时延, 将对应 SAR 回波信号进行相干累加, 从而实现每个分辨单元聚焦成像。与 RD 和 CS 等频域算法相比, BP 算法处理过程不存在近似误差, 非常适用于任意运动轨迹及任意工作模式(大斜视、聚束式、双基等)SAR 成像处理, 已被成功用于复杂运动轨迹情况下的高精度 InSAR 成像处理^[6,12]。BP 成像算法主要步骤如下:

步骤 1 确定投影成像的平面空间, 划分投影平面空间单元格;

步骤 2 回波数据距离压缩与插值, 处理后数据记为 $S_r(r, n)$;

步骤 3 对于投影空间单元格 \mathbf{P}'_w , 计算其距离历史 $R(n, \mathbf{P}'_w)$;

步骤 4 计算 \mathbf{P}'_w 在第 n 个慢时刻的回波位置 $I_{n, \mathbf{P}'_w} = \lceil \lceil (R(n, \mathbf{P}'_w)/c - T_{\text{Del}} + T_{\text{Pul}}) \kappa f_s \rceil \rceil$, 其中, $\lceil \cdot \rceil$ 表示上取整运算符, T_{Del} 表示接收波门延时, T_{Pul} 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 \mathbf{P}'_w 多普勒相位及回波相干积累 $S(\mathbf{P}'_w) = \sum_n S_r(I_{n, \mathbf{P}'_w}, n) \exp(j4\pi R(n, \mathbf{P}'_w)/\lambda)$, 其中 λ 为雷达中心频率对应的波长;

步骤 6 遍历所有平面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。

图 2 为 InSAR 成像投影空间。虽然 BP 算法可以自由选择成像投影空间, 但是在目前 InSAR 成像处理中, BP 算法仍然与传统频域成像算法相似, 将回波数据投影到某一个平面(斜距平面或水平地面)上进行成像。对于平面投影的成像处理, 若地形高程陡变时, InSAR 图像中干涉相位条纹往往过于密集甚至断裂, 不利于后期的相位解缠, 容易增大高程反演误差。另外, 起伏地形在平面上投影时也会造成几何畸变, 尤其在毫米波 InSAR, 因其波长短成像精度高、分辨单元小, 地形高程起伏引起的几何畸变将对应于 SAR 图像中更多的分辨单元, 非常不利于后期几何校正和目标特征提取。因此, 如何克服现有平面投影算法在毫米波 InSAR 在起伏地形成像面临的干涉相位过密、图像几何畸变等缺陷, 需结合 InSAR 成像原理进行新方法研究。

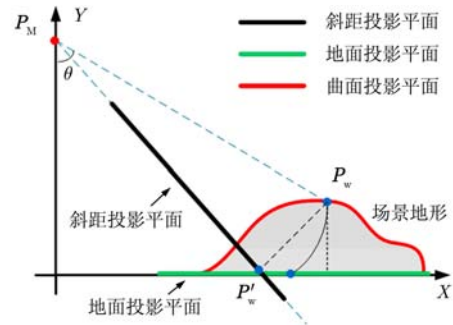


图 2 InSAR 成像投影空间

Fig. 2 The imaging projection space of InSAR

3 曲面投影 InSAR 成像

3.1 干涉相位提取原理

为了克服目前平面投影成像算法的不足, 本文将毫米波 InSAR 主副天线的回波数据投影到相同的地形高程曲面进行成像处理, 提出了一种基于曲面投影的 BP 成像算法, 简称曲面 BP 算法。

根据 SAR 成像信号模型, 距离压缩后点目标 \mathbf{P}_w 的主副天线回波信号可表示为:

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{Mr}}(r, n; \mathbf{P}_w) &= \gamma_{\text{Mr}}(R_{\text{M}}(n, \mathbf{P}_w)) \exp(-j4\pi R_{\text{M}}(n, \mathbf{P}_w)/\lambda) \\ S_{\text{Sr}}(r, n; \mathbf{P}_w) &= \gamma_{\text{Sr}}(R_{\text{S}}(n, \mathbf{P}_w)) \exp(-j4\pi R_{\text{S}}(n, \mathbf{P}_w)/\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, $\gamma_{\text{Mr}}(R_{\text{M}}(n, \mathbf{P}_w))$ 和 $\gamma_{\text{Sr}}(R_{\text{S}}(n, \mathbf{P}_w))$ 分别为 \mathbf{P}_w 在主副天线中得到的距离模糊函数。

假设点目标 \mathbf{P}_w 在地形曲面空间的投影点为 \mathbf{P}'_w , 曲面 BP 算法对式(3)中 InSAR 主副天线数据, 同时补偿主天线多普勒相位函数及投影点 \mathbf{P}'_w 到各天线参考斜距信息, 得到

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{M}}(\mathbf{P}'_w) &= \sum_n S_{\text{Mr}}(n, \mathbf{P}_w) \exp\left\{j4\pi \frac{R_{\text{M}}(n, \mathbf{P}'_w) - R_{\text{M}}(n_0, \mathbf{P}'_w)}{\lambda}\right\} \\ S_{\text{S}}(\mathbf{P}'_w) &= \sum_n S_{\text{Sr}}(n, \mathbf{P}_w) \exp\left\{j4\pi \frac{R_{\text{S}}(n, \mathbf{P}'_w) - R_{\text{S}}(n_0, \mathbf{P}'_w)}{\lambda}\right\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, n_0 为方位向上的参考慢时刻, $S_{\text{Mr}}(n, \mathbf{P}_w)$ 和 $S_{\text{Sr}}(n, \mathbf{P}_w)$ 分别为 \mathbf{P}_w 在主副天线中对应的距离压缩后回波数据, $R_{\text{M}}(n, \mathbf{P}_w)$ 和 $R_{\text{S}}(n, \mathbf{P}_w)$ 分别表示投影点 \mathbf{P}'_w 在第 n 个方位时刻到 InSAR 主副天线的斜距。

根据式(3)和式(4), 假设目标散射系数在主副天线中完全相同, 在远场条件下满足 $R_{\text{M}}(i, \mathbf{P}'_w) - R_{\text{M}}(i, \mathbf{P}_w) \approx R_{\text{M}}(j, \mathbf{P}'_w) - R_{\text{M}}(j, \mathbf{P}_w)$ 和 $R_{\text{M}}(i, \mathbf{P}'_w) - R_{\text{S}}(i, \mathbf{P}_w) \approx R_{\text{M}}(j, \mathbf{P}'_w) - R_{\text{S}}(j, \mathbf{P}_w)$, 曲面 BP 算法中点目标 \mathbf{P}'_w 的干涉相位 $\phi_{\text{T2}}(\mathbf{P}'_w)$ 为:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{T2}}(\mathbf{P}'_w) &= \angle(S_{\text{M}}(\mathbf{P}'_w) S_{\text{S}}^*(\mathbf{P}'_w)) \\ &\approx \angle\left(\sum_n \exp\left\{j4\pi \frac{\Delta R(n; \mathbf{P}_w) - \Delta R(n_0; \mathbf{P}'_w)}{\lambda}\right\}\right) \\ &= \phi_{\text{T1}}(\mathbf{P}_w) - 4\pi \Delta R(n_0; \mathbf{P}'_w)/\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\Delta R(n; \mathbf{P}_w) = R_{\text{S}}(n; \mathbf{P}_w) - R_{\text{M}}(n; \mathbf{P}_w)$ 和 $\Delta R(n_0; \mathbf{P}'_w) = R_{\text{S}}(n_0; \mathbf{P}'_w) - R_{\text{M}}(n_0; \mathbf{P}'_w)$, 而相位 $\phi_{\text{T1}}(\mathbf{P}_w) = \angle\left(\sum_n \exp(j4\pi \Delta R(n; \mathbf{P}_w)/\lambda)\right)$ 。由式(5)可知, 曲面 BP 算法干涉相位 $\phi_{\text{T2}}(\mathbf{P}'_w)$ 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 $\phi_{\text{T1}}(\mathbf{P}_w)$, 第 2 项为曲面投影点 \mathbf{P}'_w 对应的斜距差相位 $4\pi \Delta R(n_0; \mathbf{P}'_w)/\lambda$ 。

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 $L_a \ll R(n, \mathbf{P}_w)$ 。对于合成孔径时间内的任意方位向时刻 n , 则有

$$\Delta R(n; \mathbf{P}_w) \approx B \sin(\theta_{\mathbf{P}_w} - \alpha) + \frac{B^2}{2R_{\text{M}}(n, \mathbf{P}_w)} \quad (6)$$

其中 $\theta_{\mathbf{P}_w}$ 为主天线在场景点 \mathbf{P}_w 和投影点 \mathbf{P}'_w 的视角。而对于机载 InSAR 系统, 基线长度通常远小于目标斜距, 即有 $B \ll R_{\text{M}}(n, \mathbf{P}_w)$, 得到

$$\Delta R(n; \mathbf{P}_w) \approx \Delta R(n_0; \mathbf{P}_w) \approx B \sin(\theta_{\mathbf{P}_w} - \alpha) \quad (7)$$

因此, 场景点目标 \mathbf{P}_w 对应的斜距差相位 $\phi_{\text{T1}}(\mathbf{P}_w)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{T1}}(\mathbf{P}_w) &\approx \angle\left(n \exp(j4\pi \Delta R(n_0; \mathbf{P}_w)/\lambda)\right) \\ &\approx 4\pi B \sin(\theta_{\mathbf{P}_w} - \alpha)/\lambda \end{aligned} \quad (8)$$

根据式(7), 得到

$$\Delta R(n_0; \mathbf{P}'_w) \approx B \sin(\theta_{\mathbf{P}_w} - \Delta\theta_{\mathbf{P}_w} - \alpha) \quad (9)$$

其中 $\Delta\theta_{\mathbf{P}_w}$ 为主天线在场景点 \mathbf{P}_w 和投影点 \mathbf{P}'_w 的视角变化量, α 为基线倾角, 将式(8)和式(9)代入式(5), 则曲面 BP 算法中点目标 \mathbf{P}'_w 的干涉相位 $\phi_{\text{T2}}(\mathbf{P}'_w)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{T2}}(\mathbf{P}'_w) &\approx 4\pi B \frac{\sin(\theta_{\mathbf{P}_w} - \alpha) - \sin(\theta_{\mathbf{P}_w} - \Delta\theta_{\mathbf{P}_w} - \alpha)}{\lambda} \\ &\approx -4\pi B \cos(\theta_{\mathbf{P}_w} - \alpha) \Delta\theta_{\mathbf{P}_w} / \lambda \end{aligned} \quad (10)$$

因 $\Delta\theta_{\mathbf{P}_w}$ 很小, 则有

$$\Delta\theta_{\mathbf{P}_w} \approx \sin(\Delta\theta_{\mathbf{P}_w}) = \Delta z(\mathbf{P}_w, \mathbf{P}'_w) / (R(n_0, \mathbf{P}'_w) \sin(\theta_{\mathbf{P}_w})) \quad (11)$$

其中 $\Delta z(\mathbf{P}_w, \mathbf{P}'_w) = z(\mathbf{P}_w) - z(\mathbf{P}'_w)$ 为场景点 \mathbf{P}_w 与投影点 \mathbf{P}'_w 的高度差。由式(10)和式(11)得到曲面 BP 算法中点目标 \mathbf{P}'_w 干涉相位 $\phi_{\text{T2}}(\mathbf{P}'_w)$ 的数学表达式可表示为:

$$\phi_{\text{T2}}(\mathbf{P}'_w) \approx -\frac{4\pi B \sin(\theta_{\mathbf{P}_w} - \alpha) \Delta z(\mathbf{P}_w, \mathbf{P}'_w)}{\lambda R(n_0, \mathbf{P}'_w) \sin(\theta_{\mathbf{P}_w})} \quad (12)$$

从式(12)可知, $\phi_{\text{T2}}(\mathbf{P}'_w)$ 只与场景点 \mathbf{P}_w 与投影点 \mathbf{P}'_w 的高度差 $\Delta z(\mathbf{P}_w, \mathbf{P}'_w)$ 有关, 而与其水平距离差无关, 即 $\phi_{\text{T2}}(\mathbf{P}'_w)$ 去除了传统 InSAR 成像算法中点 \mathbf{P}_w 与 \mathbf{P}'_w 之间的平地相位^[13]。若选择的投影曲面使得高度差 $\Delta z(\mathbf{P}_w, \mathbf{P}'_w)$ 越小, 则干涉相位 $\phi_{\text{T2}}(\mathbf{P}'_w)$ 的值就越小; 若投影曲面选择为场景真实高度, 即 $\Delta z(\mathbf{P}_w, \mathbf{P}'_w) = 0$, 则干涉相位 $\phi_{\text{T2}}(\mathbf{P}'_w)$ 的值为 0。因

此，通过选择合理的投影曲面使得干涉相位 $\phi_{T2}(\mathbf{P}'_w)$ 的值最小，从而可以减小曲面投影 BP 干涉相位的缠绕。

由于实际中未知地形的真实高程信息，本文曲面 BP 采用迭代处理思想，先选择水平地面作为投影曲面初值，根据该投影获取干涉相位并反演高程，反演得到的地形高程再作为下一次迭代的投影曲面，利用多次迭代从而可以逐步减少干涉相位缠绕，并且估计得到的地形高程越逼近真实的地形高程。

3.2 算法流程

根据 3.1 节干涉相位提取原理，基于迭代处理的曲面 BP 算法的主要步骤如下：

步骤 1 InSAR 回波数据距离压缩与插值，处理后数据记为 $S_{Mr}(n, \mathbf{P}_w)$ 和 $S_{Sr}(n, \mathbf{P}_w)$ ；

步骤 2 给出初始地形高程曲面 $\Omega^{(0)}$ 、迭代最大次数 M_0 、迭代条件阈值 η_0 ，迭代次数 $i = 0$ ；

步骤 3 在第 i 次迭代过程中，均匀划分地形高程曲面 $\Omega^{(i)}$ ，对于曲面中每一个单元格 \mathbf{P}'_w ，计算其距离历史 $R_M(n, \mathbf{P}'_w)$ 和 $R_S(n, \mathbf{P}'_w)$ ；

步骤 4 根据式(4)，采用 BP 算法得到第 i 次迭代过程中的主副天线图像，记为 $I_M^{(i)}(x, y)$ 和 $I_S^{(i)}(x, y)$ ；

步骤 5 利用 $I_M^{(i)}(x, y)$ 和 $I_S^{(i)}(x, y)$ 得到主副天线的干涉相位 $\phi(x, y)$ ，并对 $\phi(x, y)$ 进行滤波和解缠等干涉相位处理；

步骤 6 根据式(12)计算得到相对地形高程 \mathbf{Z} ，并且更新第 $i+1$ 次迭代的地形高程曲面 $\Omega^{(i+1)} = \Omega^{(i)} + \mathbf{Z}$ ；

步骤 7 如果 $\|\mathbf{Z}\|_2 \geq \eta_0$ 且 $i \leq M_0$ ，则 $i \leftarrow i + 1$ ，重复执行步骤 3 至步骤 7，否则 $I_M^{(i)}(x, y)$ 和 $I_S^{(i)}(x, y)$

即为算法最终的主副天线成像结果， $\Omega^{(i)} + \mathbf{Z}$ 即为 InSAR 得到的最终地形高程。

从迭代曲面 BP 算法步骤可知，估计得到的第 i 次迭代地形高程 $\Omega^{(i)}$ 越来越接近真实地形高程，而相对地形高程 \mathbf{Z} 则随着迭代次数增加越来越小。一般情况下，迭代次数为 10 多次时即可满足估计精度要求。本文中选择不地形高程 \mathbf{Z} 作为迭代终止条件，另外也可以选择残余干涉相位或者相邻迭代间估计结果的变化量作为迭代终止条件。从曲面 BP 算法原理可知，该算法不仅保持传统 BP 算法的成像性能，可对复杂运动条件下 InSAR 数据进行良好聚焦，还保留主副天线到场景目标的斜距差相位，得到曲面投影点目标 \mathbf{P}'_w 的干涉相位 $\phi_{T2}(\mathbf{P}'_w)$ ，能够实现曲面空间高精度成像和干涉相位提取。

4 数据成像结果

4.1 仿真数据结果

为了验证曲面投影算法在毫米波 InSAR 的成像性能，本节利用面目标仿真数据进行分析。仿真主要参数为：雷达载频 $f_c = 37.5$ GHz，发射信号带宽 $B_r = 1$ GHz，天线方位真实孔径长度 $D = 0.3$ m，平台高度 $H = 3000$ m，信号脉冲宽度 $T_r = 5$ ms，脉冲重复频率 PRF = 550 Hz，雷达入射角 $\theta = 45^\circ$ ，垂直基线长度 $B = \sqrt{2}/2$ m，平台做直线运动且速度服从均值为 $v = 60$ m/s，标准方差为 $\sigma = 1$ m/s 的随机分布。仿真场景为圆锥曲面，圆锥场景大小为 60 m \times 60 m，锥心高度为 16 m，其场景如图 3(a) 所示，散射系数如图 3(b) 所示。在仿真过程中加入信噪比为 25 dB 的乘性随机噪声。

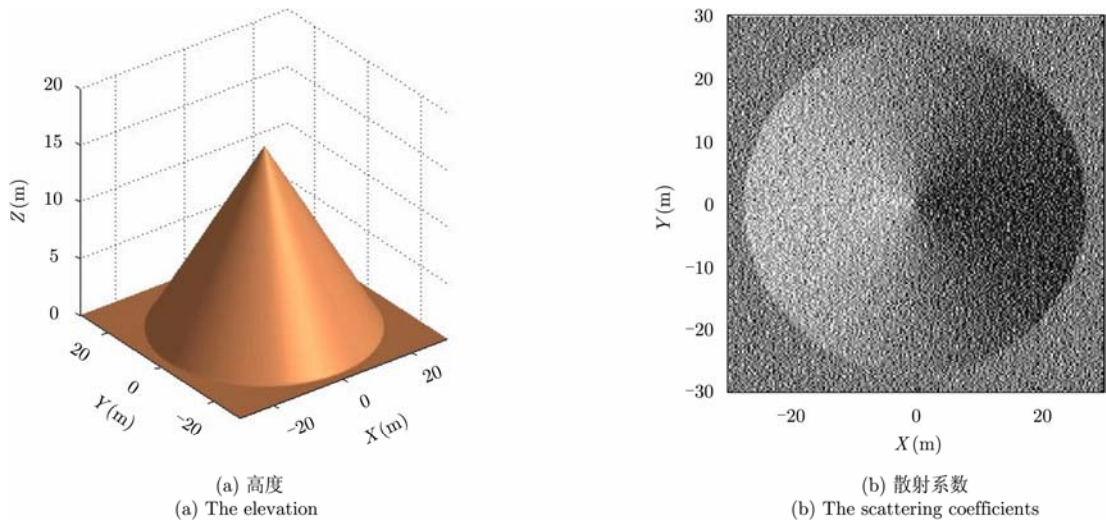


图 3 原始仿真圆锥场景

Fig. 3 The original simulated cone

利用 RD 算法、地平面投影 BP 算法和本文曲面投影算法对主副天线圆锥场景仿真数据进行成像,得到的幅度图像和干涉相位如图 4(b)–图 4(d)所示,其中曲面投影算法中以真实圆锥高度作为投影曲面。从图 4(a)–图 4(c)可看出,因 RD 算法在斜距平面上成像,图像中圆锥底部在距离向的直径较真实值减小,圆锥高度导致圆锥中心左移,即同时存在水平和高度引起的几何畸变;地平面 BP 算法图像中圆锥底部直径和真实值基本相同,消除了水平引起的畸变,但圆锥高度同样导致了圆锥中心左移,即存在高度引起的几何畸变;曲面投影算法图像中圆锥几何形状与真实场景吻合,消除了水平和高度引起的畸变,更真实地描述了圆锥特征。从图 4(d)–图 4(f)可看出, RD 算法中存在平地相位和高度相位混叠且干涉相位存在缠绕条纹,不利于目标高程反演;地平面投影 BP 算法中虽然去除了平地相位,但仍存在缠绕条纹,若条纹过密则相位解缠困难,同样不利于目标高程反演;曲面投影算法中相位不存在缠绕条纹,更有利于目标高度反演。

在未知圆锥地形高程情况下,假设高程初值为 0,图 5 给出了迭代曲面 BP 投影算法在第 2 次,

第 4 次和第 7 次迭代过程中得到仿真圆锥的幅度图像、干涉相位和估计的地形高度图。从图 5 可看出,随着迭代次数的增加,曲面 BP 算法的成像结果中圆锥场景的几何畸变越来越小,而且干涉相位缠绕值也逐渐减少,得到的地形高度逐次逼近了真实的圆锥高度。为了定量分析不同迭代次数的曲面 BP 算法的高程估计和干涉相位性能,本文利用估计高程均方差(MSE)、残余高程均值和残余干涉相位均值 3 个指标进行评估,其中高程 MSE 表示为 $MSE = \|z' - z_0\|_2 / \|z_0\|_2$, z' 为估计的地形高程, z_0 为真实地形高程,残余高程均值为曲面投影后所得高程的均值,残余干涉相位均值为曲面投影后所得干涉相位的均值。表 1 给出了真实地形 DEM 和不同迭代次数的曲面 BP 算法结果在 3 种指标下的结果,从表 3 可知,因相位噪声等真实 DEM 投影时高程 MSE 为 0.1567 m,在第 1 次迭代投影成像(投影曲面为水平地面)时对应的高程 MSE 为 0.3720 m,随着迭代次数的增加,高程 MSE、残余高程均值和残余干涉相位均值逐渐减小,当在第 7 次迭代时高程 MSE 为 0.1576 m,已非常接近真实 DEM 投影成像。仿真结果验证了曲面 BP 算法的有效性。

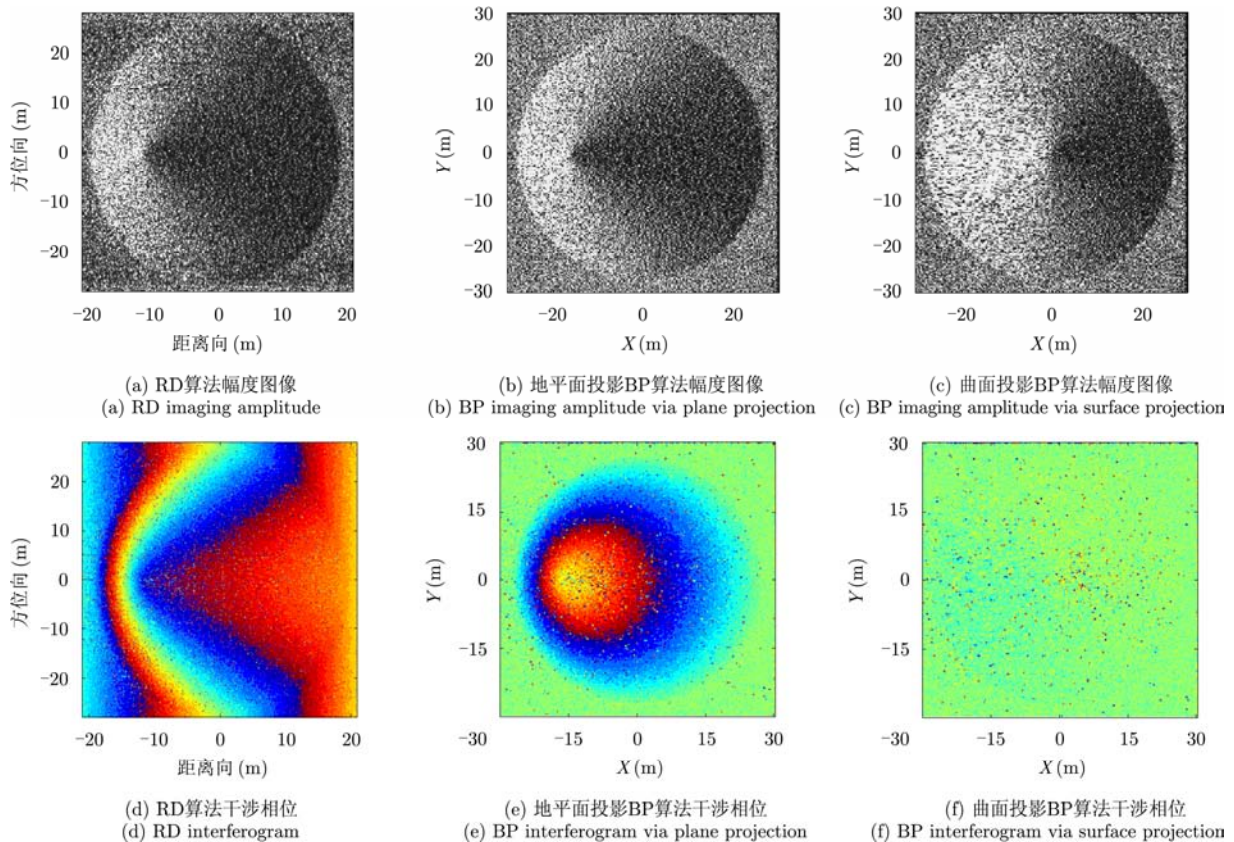


图 4 仿真圆锥幅度图像及干涉相位

Fig. 4 The amplitudes and the interferograms of the simulated cone

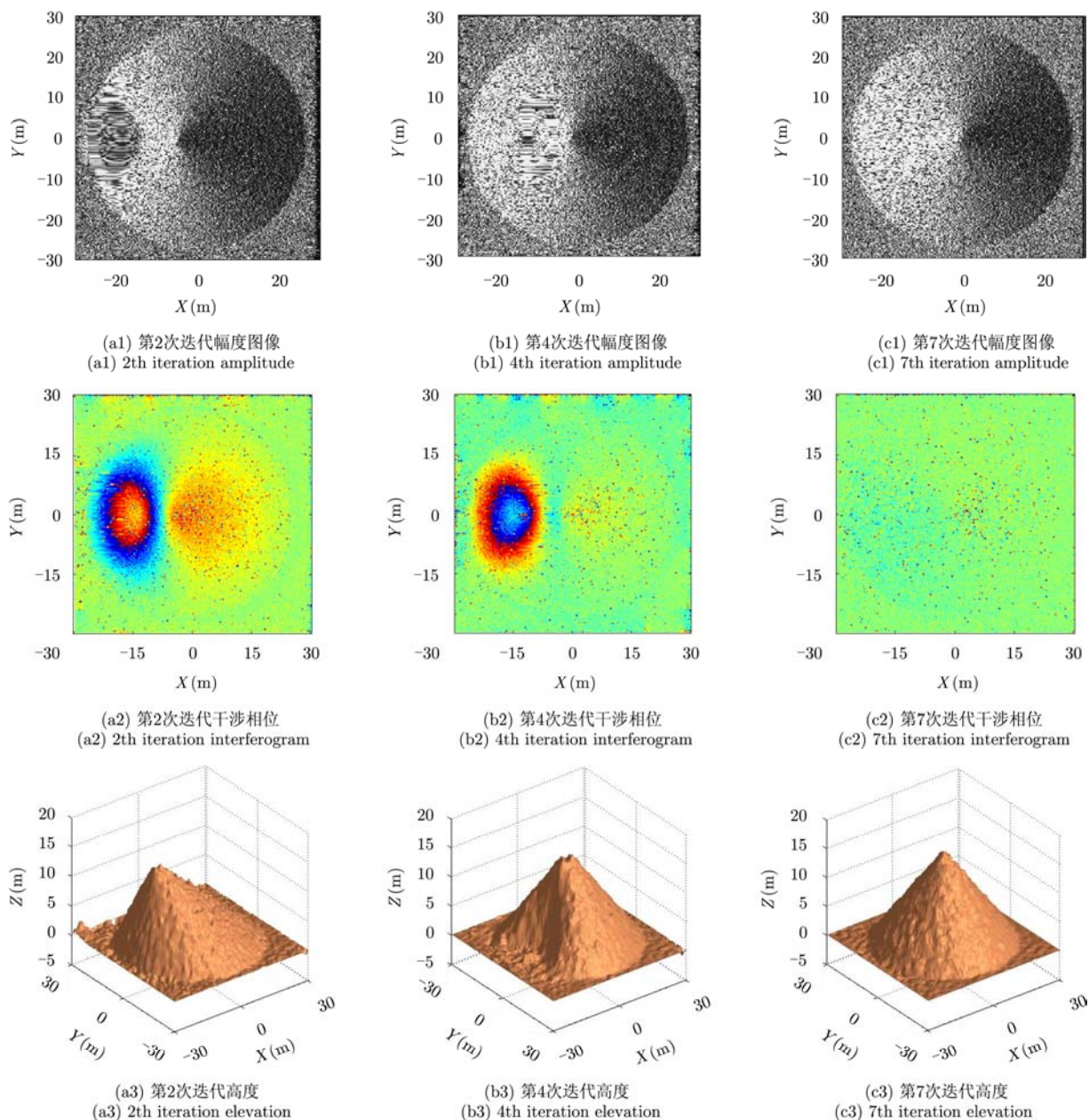


图 5 迭代曲面 BP 仿真圆锥成像结果

Fig. 5 The imaging results of the simulated cone

表 1 不同迭代次数的曲面 BP 算法估计高度和干涉相位评估

Tab. 1 Estimated elevation and interferometric phase of BP algorithm for different iteration times

曲面投影算法	高程 MSE(m)	残余高程均值(m)	残余相位均值(rad)
真实 DEM 投影	0.1567	0.5416	0.2005
第 1 次迭代	0.3720	3.4531	1.2785
第 2 次迭代	0.2253	1.5638	0.5790
第 3 次迭代	0.2066	1.1569	0.4283
第 4 次迭代	0.1783	1.0361	0.3836
第 5 次迭代	0.1647	0.9148	0.3387
第 6 次迭代	0.1584	0.8462	0.3133
第 7 次迭代	0.1576	0.7945	0.2942

4.2 实测数据结果

为了进一步验证本文算法的有效性,本节利用某机载Ka波段毫米波InSAR实测数据进行成像分析,该InSAR系统采用天线一发双收的成像模式,基线长度为 $B = 0.31\text{ m}$ 。因为大气湍流等导致的机载平台抖动以及平台运动控制系统精度等非理想因素的影响,毫米波机载InSAR平台不能完成理想的匀速直线运动,而是做非直线非匀速运动,其主副天线的真实运动轨迹如图6(a)所示,运动轨迹

在水面和高度向上有一定的弯曲。本文选取该系统获取的一段某城市郊区区域的观测数据进行成像,该观测数据的场景光学图如图6(b)所示,观测场景中地势比较平坦,场景中主要由农作物、树林、农田、小路和沟渠等组成。

图7为分别用RD算法、地平线投影BP算法和曲面投影BP算法对实验场景毫米波InSAR数据进行成像得到的结果,其中,所有算法成像后的图像均进行了窗口为 3×3 的多视处理,图7(a)为主

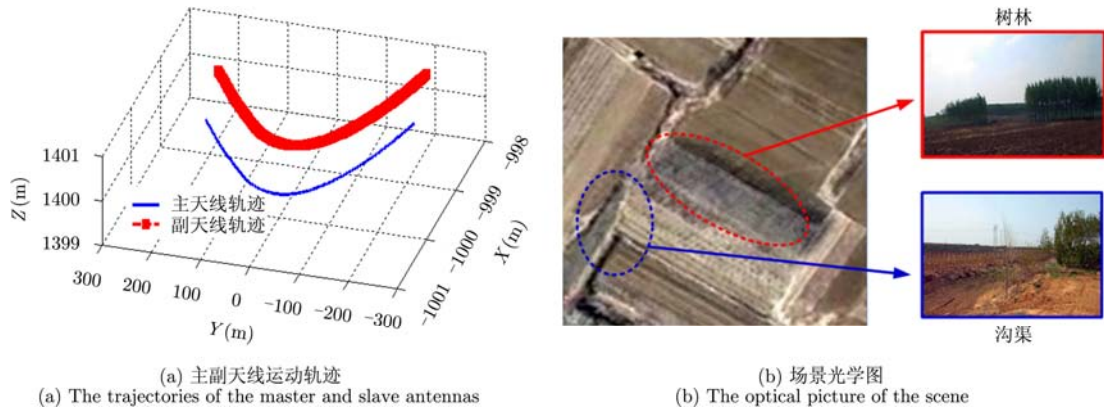


图6 毫米波InSAR天线轨迹与实验场景

Fig. 6 The trajectory of the millimeter-wave InSAR antennas and its underlying scene

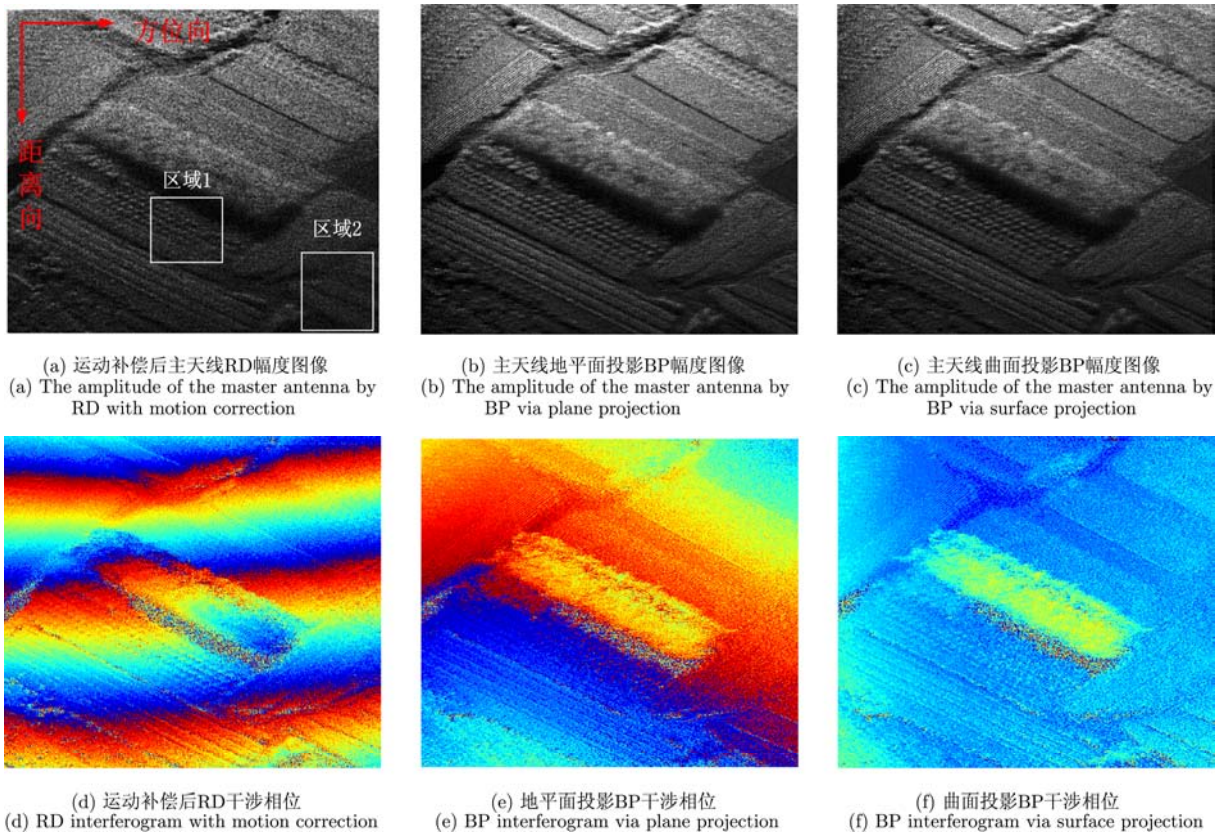


图7 毫米波机载InSAR实测数据成像结果

Fig. 7 The results of millimeter-wave airborne InSAR real data

天线利用运动补偿后 RD 算法成像得到的幅度图, 图 7(b)为主天线利用地平面投影 BP 算法成像得到的幅度图, 图 7(c)为主天线利用曲面投影 BP 算法成像得到的幅度图, 图 7(d)为运动补偿后 RD 算法成像得到的干涉相位图, 图 7(e)为地平面 BP 算法成像得到的干涉相位图, 图 7(f)为曲面 BP 算法成像得到的干涉相位图。实测数据成像中 RD 成像算法采用基于子孔径处理的相位梯度自聚焦(PGA)方法进行运动补偿^[14], 两种 BP 成像算法则利用真实的机载平台非直线轨迹进行成像, 而且曲面投影 BP 算法采用了 2 次迭代处理。对比观测场景幅度图像, 因运动补偿后仍然会残留一定的误差, 故运动补偿后的 RD 算法在某些农田和小路区域仍有一定的散焦, 地平面投影 BP 和曲面投影 BP 算法结果则良好地实现了田地和植被等全部场景的聚焦。因观测场景地势较平坦, 地形起伏引起的几何畸变较小, 故 3 种算法成像结果中目标几何形状变化不明显。从图 7 干涉相位可明显看出, RD 算法因其在

斜距平面上投影成像, 故存在 3 个条纹的平地相位, 其干涉相位图条纹较多, 不利于后期干涉相位解缠和高程反演; 地平面投影 BP 算法去除了平地相位, 但还存在地形起伏和树林高度引起的干涉相位, 导致了干涉相位图的缠绕; 曲面 BP 算法进一步去除了地形起伏和树林高度引起的干涉相位, 干涉相位无缠绕, 更有利于后期干涉相位处理。为了进一步比较成像算法的性能, 从图 7 中幅度图像结果中选择两个子区域进行放大显示, 其幅度图如图 8 所示, 其中子区域 1 中目标为农作物, 子区域 2 中目标为多条田埂。通过图 8 对比可发现, 较运动补偿后的 RD 算法, 基于真实运动轨迹成像的地面投影 BP 和曲面投影 BP 算法的聚焦质量有了大幅度的提升, 农作物形状和田埂分布等都清晰可见。由图 7 和图 8 可知, 本文曲面投影 BP 算法可以实现非直线非匀速运动轨迹下毫米波 InSAR 数据的良好聚焦, 并且减少了干涉相位缠绕, 实验结果验证了曲面投影 BP 算法在 InSAR 成像的有效性。

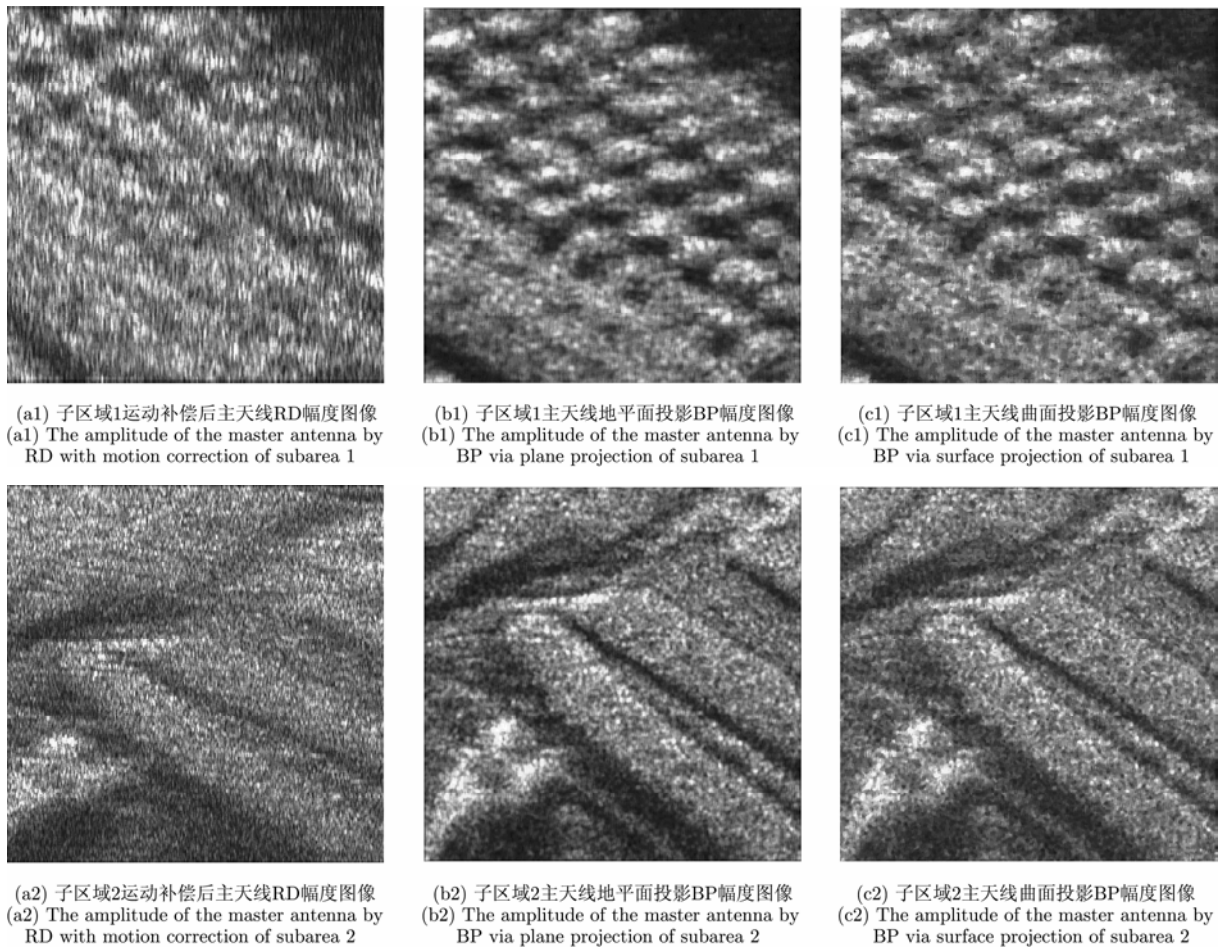


图 8 毫米波机载 InSAR 实测数据成像结果

Fig. 8 The results of millimeter-wave airborne InSAR real data

5 结论

本文针对传统平面投影成像方法在毫米波 InSAR 数据成像中存在的干涉相位缠绕过密、几何畸变等不足,提出了一种曲面投影的毫米波 InSAR 成像方法。该方法将毫米波 InSAR 原始回波数据投影到估计得到的地形高程曲面上进行成像,从而得到该地形高程曲面下的干涉相位,再利用该干涉相位进行高程地形反演得到相对高度,然后对高程曲面进行高度补偿,通过多次迭代逼近成像,得到最终的毫米波 InSAR 成像结果和地形高程。本文提出的曲面投影方法具有以下优点:

(1) 采用后向投影成像算法,在理论上具有理想的成像聚焦和保相精度,相对于 RD 等频域成像算法, BP 算法没有对斜距进行近似估计,能够实现成像空间中每个采样点的精确聚焦和高保相成像,有利于高精度地形高程反演。

(2) 通过多次迭代成像,克服了由于 InSAR 成像机理造成的地形几何畸变的缺点,同时使得到的地形高程不断逼近真实地形,大大提高了毫米波 InSAR 高程反演的精度。

致谢 感谢航天科工二院 23 所提供研究所需的 Ka 波段干涉 SAR 数据。

参考文献

- [1] 李道京. 毫米波干涉合成孔径雷达[J]. 高技术与产业化, 2013(11): 40-43.
Li Dao-jing. Millimeter-wave interferometric SAR[J]. *High-Technology & Industrialization*, 2013(11): 40-43.
- [2] D'Addio S and Ludwig M. Modelling and analysis of rain effect on Ka-band single pass InSAR performance[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009, 4: 913-916.
- [3] Schmitt M and Stilla U. Adaptive multilooking of airborne Ka-band multi-baseline InSAR data of urban areas[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012: 7401-7404.
- [4] Mokadem A, Thirion-Lefevre L, and Colin-Koeniguer E. Analysing urban areas in the frame of non-line of sight target detection. Electromagnetic modelling, validation and application to real data in Ka-band[C]. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Torino, Italy, 2013: 543-546.
- [5] 潘舟浩, 刘波, 李道京, 等. 毫米波三基线 InSAR 系统误差校正和信号分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2464-2470.
Pan Zhou-hao, Liu Bo, Li Dao-jing, et al. Millimeter wave three baseline InSAR system error correction and signal analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2464-2470.
- [6] 刘波, 潘舟浩, 李道京, 等. 基于毫米波 InSAR 成像的运动目标探测与定位[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(3): 258-264.
Liu Bo, Pan Zhou-hao, Li Dao-jing, et al. Moving target detection and location based on millimeter-wave InSAR imaging[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(3): 258-264.
- [7] 潘舟浩, 李道京, 刘波, 等. 基于 BP 算法和时变基线的机载 InSAR 数据处理方法研究[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(7): 1585-1591.
Pan Zhou-hao, Li Dao-jing, Liu Bo, et al. Processing of the airborne InSAR data based on the BP algorithm and the time-varying baseline[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(7): 1585-1591.
- [8] Walker B, Sander G, Thompson M, et al. A high-resolution, four-band SAR testbed with real-time image formation[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Lincoln, NE, USA, 1996, 3: 1881-1885.
- [9] Magnard C, Meier E, Ruegg M, et al. High resolution millimeter wave SAR interferometry[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007: 5061-5064.
- [10] Magnard C, Meier E, Small D, et al. Processing of MEMPHIS millimeter wave multi-baseline InSAR data[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI, USA, 2010: 4302-4305.
- [11] Shi Jun, Ma Long, and Zhang Xiao-ling. Streaming BP for non-linear motion compensation SAR imaging based on GPU[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(4): 2035-2050.
- [12] 师君, 马龙, 韦顺军, 等. 基于导航数据的 Ka 波段 InSAR 成像处理与分析[J]. 雷达学报, 2014, 3(1): 19-27.
Shi Jun, Ma Long, Wei Shun-jun, et al. Ka-band InSAR imaging and analysis based on IMU data[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(1): 19-27.
- [13] 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.
Wang Chao, Zhang Hong, and Liu Zhi. Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry[M]. Beijing: Science Press, 2002: 37-66.
- [14] Zhu Dai-yin, Jiang Rui, Mao Xin-hua, et al. Multi-subaperture PGA for SAR autofocusing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(1): 468-488.

作者简介



韦顺军(1983-), 男, 广西人, 获电子科技大学工学博士学位, 目前为电子科技大学讲师, 主要从事 SAR 成像技术、干涉 SAR 技术研究。

E-mail: weishunjun@uestc.edu.cn



张晓玲(1964-), 女, 四川人, 获电子科技大学工学博士学位, 目前为电子科技大学教授/博士生导师, 主要从事 SAR 成像技术、雷达探测技术研究。

E-mail: xlzhang@uestc.edu.cn



师君(1979-), 男, 河南人, 获电子科技大学工学博士学位, 目前为电子科技大学副教授, 主要从事 SAR 数据处理方面研究。

E-mail: shijun@uestc.edu.cn



陈刚(1976-), 男, 陕西人, 获国防科技大学工学硕士学位, 目前为西安测绘研究所副研究员/副主任, 主要从事 InSAR 数据处理、干涉定标技术研究。

E-mail: splitter@263.net