

一种InSAR建筑物图像仿真及高程反演方法

王超^{①②③} 仇晓兰^{*①②} 李芳芳^{①②} 雷斌^{①②}

^①(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 城市建筑区域叠掩、阴影严重, 图像理解困难且干涉相位变化复杂紊乱, 一直是InSAR处理的困难区域。SAR图像仿真能为图像理解和处理方法研究提供数据支撑, 然而现有建筑区域SAR图像仿真方法大多无法获得具有相干性的干涉SAR图像对。该文提出了一种面向建筑区域的干涉SAR复图像对仿真方法, 能够获得建筑的复数图像对、干涉相位图以及叠掩成分数目等信息, 为城区干涉SAR处理及信息提取研究提供仿真数据支撑。同时, 基于仿真中对相位变化规律的分析, 提出叠掩区相位解缠时的基准确定方法, 解决传统解缠方法面临的叠掩区域干涉相位不连续问题, 进而反演建筑高程信息。最后, 通过建模仿真结果与实际SAR图像和干涉相位的对比, 验证了仿真方法的正确性, 并对仿真及实际干涉相位进行解缠和高程反演处理, 验证了该文高程反演方法的有效性。

关键词: 干涉SAR; 仿真; 高程反演; 相位解缠; 叠掩

中图分类号: TN959.1+7

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)02-0373-13

DOI: 10.12000/JR20010

引用格式: 王超, 仇晓兰, 李芳芳, 等. 一种InSAR建筑物图像仿真及高程反演方法[J]. 雷达学报, 2020, 9(2): 373–385. doi: 10.12000/JR20010.

Reference format: WANG Chao, QIU Xiaolan, LI Fangfang, *et al.* An InSAR image simulation and elevation inversion method for buildings[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(2): 373–385. doi: 10.12000/JR20010.

An InSAR Image Simulation and Elevation Inversion Method for Buildings

WANG Chao^{①②③} QIU Xiaolan^{*①②} LI Fangfang^{①②} LEI Bin^{①②}

^①(Key Laboratory of Technology in Geospatial Information Processing and Application System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The layover and shadow phenomenon is serious in urban areas, where the interferometric phase is complex and disordered and interpretation of an image is difficult. Therefore, it is always a hot and difficult problem for InSAR processing. SAR image simulation can provide data support for the study of image processing and understanding methods. However, most existing SAR image simulation methods for construction areas cannot obtain coherent interferometric SAR image pairs. This article proposes an InSAR simulation method for buildings. It can simulate complex images, interferograms, and the number of layover components of the construction areas. In addition, based on the analysis of the phase variation characteristics of the simulation, a reference determination method for the unwrapped phase in the layover area is proposed. It solves the problem of discontinuity of the interferometric phase in the construction areas, with which the traditional method of unwrapping cannot deal effectively. We compared the simulated results using the actual SAR images

收稿日期: 2020-02-13; 改回日期: 2020-04-17

*通信作者: 仇晓兰 xlqiu@mail.ie.ac.cn *Corresponding Author: QIU Xiaolan, xlqiu@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61991420, 61991421)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61991420, 61991421)

责任编辑: 靳国旺 Corresponding Editor: JIN Guowang

and interferometric phase and verified the correctness of our simulation method. Moreover, we carry out phase unwrapping and elevation inversion experiments using the simulated and real images and verified the effectiveness of our phase unwrapping method in applying the InSAR elevation inversion.

Key words: Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR); Simulation; Elevation inversion; Phase-unwrapping; Layover

1 引言

SAR图像仿真在辅助SAR图像解译、提供SAR目标识别样本等方面具有十分重要的作用。在建筑区等复杂区域，SAR图像仿真可以为复杂散射现象的理解、城区目标信息的提取提供支撑。尤其对于干涉SAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)而言，城区存在大量叠掩和阴影，使得干涉相位连续性差，相位解缠困难，因此一直是干涉SAR处理的困难区域，如能够通过仿真获得干涉SAR复图像对，并同时获得干涉相位、叠掩分布等相关信息，则可以为城区的干涉SAR数据处理、高程反演等研究提供充分的数据条件，促进干涉SAR数据处理技术的进步。

现有关于InSAR仿真的研究主要包括两种。一种是根据地物散射的电磁物理模型进行建模计算，仿真干涉图像对并获得干涉相位结果。已有工作针对林地、植被等地区进行了极化干涉SAR数据仿真方法的研究。如Liu等人^[1,2]和Xue等人^[3,4]提出了用于林冠的3D干涉雷达后向散射模型，用介电几何体表示3D树木模型(圆柱表示茎和枝，圆盘表示叶)，模拟不同种树木或混种林，得到后向散射和植被结构的关系模型来用于仿真计算，得到极化SAR图像，并可用于干涉处理。Xu等人^[5]借助简单几何体的电磁散射模型构建散射特征字典，进行仿真和目标几何参数反演。但目前该类方法只适用于植被区域且多不考虑多次散射，暂无法用于对建筑目标区域的干涉仿真。第2种方法是干涉相位和SAR图像分开仿真，目前主要用于地形仿真，在数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的支撑下，直接根据两个雷达天线的位置计算斜距差，从而直接得到干涉相位，同时根据地物散射强度模型，获得散射幅度图像；这种方法通常在仿真获得干涉相位后增加随机噪声，以模拟实际干涉相位，用于验证相位滤波等方法的性能。张红敏等人^[6]和靳国旺等人^[7]按照该方法进行了InSAR干涉图的直接仿真，可用于相位滤波等后续处理方法地研究。但上述思路也只能考虑单次散射，且难以仿真建筑等复杂目标的干涉相位图。此外，在针对建筑区域高分辨率SAR图像仿真方面，Auer等人^[8,9]利用开源软件POV-Ray进行SAR图像模拟，借此分析建

筑目标多次散射的产生机理。该方法只能得到单张SAR复数图像，即便根据InSAR两个天线位置独立仿真两次，并进行精细配准，由于独立仿真时散射点没有严格的对应关系，干涉相位会受到网格划分和散射点不一致的影响而造成相位不正确。Hammer等人^[10]在射线追踪方法和目标多边形近似的基础上，仿真大范围复杂场景和目标并生成复数图像，但其也不能直接用于干涉SAR图像对的仿真。可以说，目前建筑区域InSAR图像对的快速仿真还未见有效方法。

现有针对建筑区域InSAR相位解缠和高程反演等方面的研究也还比较少。传统的InSAR处理将建筑区域作为困难区域对待，通过滤波等方式将建筑区的紊乱相位进行一定程度的滤除^[11,12]，仅恢复其大尺度的地形趋势，不追求其对于建筑高程等细节的保持。也有研究者采用多基线InSAR的方法来提升高程信息获取的可靠性和精确性^[13]，但多基线InSAR数据的获取较为困难。随着InSAR图像分辨率不断提升，其在地物目标精细高程信息提取方面的潜力不断显现，已有研究者开始探索城区的InSAR处理方法^[14]。王青松等人^[15]建立了InSAR叠掩区域相位模型，推导叠掩区域的相位特性，针对该特性给出了叠掩区域的相位重构方法。Cellier等人^[16]建立两个叠掩分量时的信号模型，结合干涉SAR和极化SAR来解决两个叠掩分量时的高程估计问题。Liu等人^[17]通过连续小波变换在缠绕相位中检测叠掩锯齿，获取叠掩像素，再将叠掩像素融合为区域。张同同等人^[18]利用雷达卫星成像时的几何模型与图像处理中形态学方法综合识别叠掩与阴影区域。Rossi等人^[19]在高度模型中对每个像素计数，发现叠掩区的计数呈现一定规律，以此来实现叠掩区检测。上述方法推进了建筑区域干涉处理方法的研究，但在普适性方面还有较大差距。近期，Yu等人^[20]提出利用PGNet估计干涉相位图的水平和垂直梯度，利用深度学习强大的特征表达抽象能力，根据海量不同条纹特征和不同噪声水平的干涉图挖掘相位梯度的规律性问题，从而直接进行解缠。该研究是深度学习引入InSAR处理的有益尝试，但PGNet网络的训练需要大量的干涉数据和相位真值作为训练样本，这正是目前所缺乏的。

本文基于射线追踪方法,提出了一种适用于建筑区域的干涉SAR复图像对仿真方法。针对建筑目标建立三维模型,使用射线追踪方法进行SAR图像仿真,获取可干涉的复数图像对和相应的叠掩成分数目图。在此基础上,进一步提出了基于叠掩区域掩膜指导的建筑区域干涉相位解缠方法,以解决建筑区干涉相位不连续、传统解缠方法无法有效处理的问题。通过建模仿真结果与实际SAR图像及干涉相位的对比,验证了仿真方法的正确性,并通过对仿真及实际干涉相位的解缠处理,验证了本文相位解缠方法在干涉SAR高程反演应用中的有效性。

本文方法的创新性和优势在于:

(1) 构建了建筑物目标的干涉SAR仿真方法,能够获得具有相干性的InSAR图像对,且能够考虑多次散射等的影响,并得到叠掩成分数目图;

(2) 提出了基于叠掩区掩膜指导的建筑区域干涉SAR相位解缠方法,提升建筑区域InSAR三维信息获取能力;

(3) 本仿真方法可以为SAR图像叠掩、阴影区检测提供大量的仿真图像样本和真值标记,为复杂区域的相位解缠、三维重建等方法研究提供数据支撑。

本文后续章节内容安排如下:第2节介绍了本文提出的InSAR图像对仿真方法,以及叠掩成分数目的筛选统计方法;第3节介绍了基于叠掩区掩膜指导的干涉相位解缠与高程反演方法;第4节给出了仿真结果与实际数据的比对分析,验证了方法的有效性;第5节给出总结。

2 InSAR建筑区图像仿真方法

2.1 仿真方法

本文首先建立目标三维模型和干涉SAR成像系统参数,使用射线追踪方法获得目标后向散射点位置,再按照成像几何参数,针对主辅天线分别进行距离历程和后向散射强度的计算,并将其投影至斜距-方位平面,分别获得主图像和辅图像数据,通过主辅图像共轭相乘获得干涉相位。仿真流程如图1所示。

SAR图像仿真几何如图2所示。首先,根据主雷达位置、射线在雷达出射面的分布范围($w_{\text{ray}}, h_{\text{ray}}$)和射线分辨率($\Delta r_{\text{ray}}, \Delta a_{\text{ray}}$)确定射线起点和在方位向、距离向上的数量为

$$N_{r_ray} = \frac{h_{\text{ray}}}{\Delta r_{\text{ray}}}, N_{a_ray} = \frac{w_{\text{ray}}}{\Delta a_{\text{ray}}} \quad (1)$$

借助仿真软件POV-Ray实现射线追踪,每条射线经由场景目标可进行多次散射产生多个散射点,记录每个散射点的位置、斜距、散射强度等信息,即主雷达产生的散射点属性。其中散射强度的

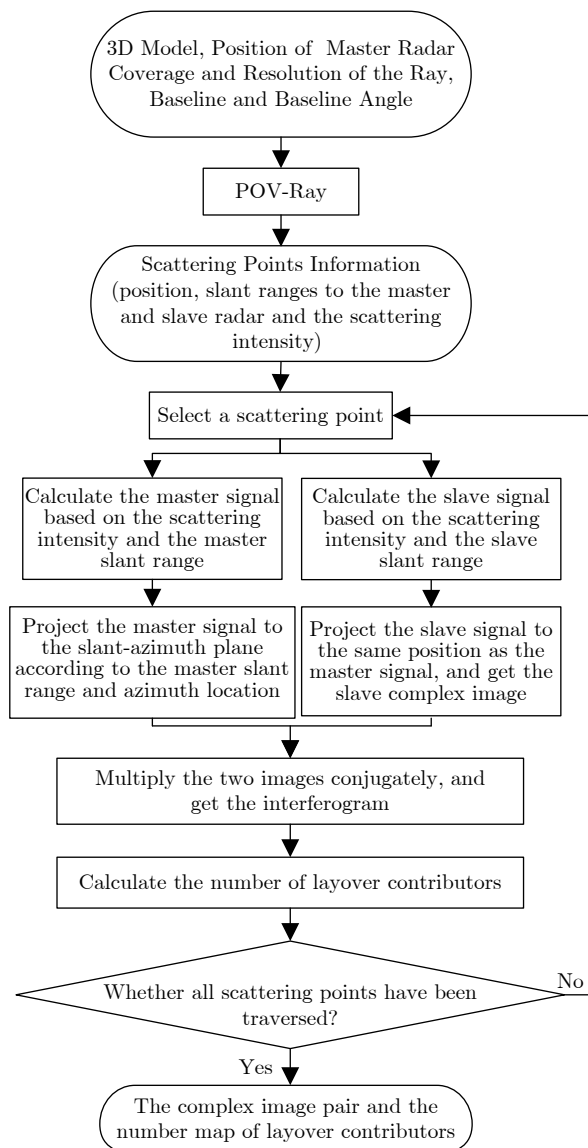


图1 SAR图像对仿真流程

Fig. 1 The simulation method for SAR image pair

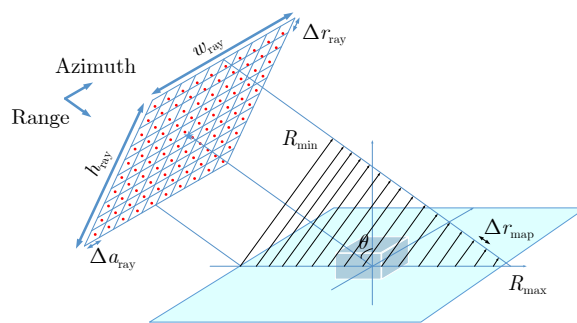


图2 SAR图像仿真几何设定

Fig. 2 The simulation geometry for SAR image

计算与表面参数和入射角有关,具体参见文献[21]。然后,根据预设的SAR图像像素尺寸(W, H)、成像分辨率($\Delta r_{\text{map}}, \Delta a_{\text{map}}$)、图像近距 R_{min} 、方位向起始位置 A_{min} ,将斜距为 r 、方位向位置为 a 的散射点

(r, a) 映射至斜距-方位向平面的 $(r_{\text{pixel}}, a_{\text{pixel}})$ 像素位置, 如式(2)

$$r_{\text{pixel}} = \frac{r - R_{\min}}{\Delta r_{\text{map}}}, a_{\text{pixel}} = \frac{a - A_{\min}}{\Delta a_{\text{map}}} \quad (2)$$

根据给定的主雷达位置及基线长度 B 、基线角 α , 计算辅助雷达位置。复用主图像仿真中射线追踪得到的散射点位置, 计算所有散射点到辅雷达的斜距。

对于建筑物而言, 记场景中距离主雷达斜距为 r_1 、方位位置为 a_1 的点为 P , 在主图像中投影至 (r_1, a_1) 像素。将散射点映射至主图像时, 按照主雷达斜距 r_1 计算相位, 并添加随机噪声。同理, P 到辅雷达距离为 r_2 , 在辅图像中本应映射至 (r_2, a_2) 。 P 点在主辅图像中的信号分别为

$$\left. \begin{aligned} S_m(r_1, a_1) &= A e^{-j \frac{4\pi r_1}{\lambda}} e^{j\phi_{n1}} \\ S_s(r_2, a_2) &= A' e^{-j \frac{4\pi r_2}{\lambda}} e^{j\phi_{n2}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

A, A' 分别为主辅图像中的后向散射系数的幅度, ϕ_{n1}, ϕ_{n2} 分别为主辅图像的相位在该像素处的相位噪声, 本文仿真中加入了高斯分布的相位噪声。干涉相位 ϕ_w 为主辅图像共轭相乘取相位的结果为

$$\phi_w = \text{angle}\{S_m(r_1, a_1) \cdot S_s^*(r_2, a_2)\} \quad (4)$$

本仿真方法中, 对于辅图像而言, P 点按照斜距 r_2 计算相位, 但为了保证主辅图像精确配准, 按照斜距 r_1 映射至与主图像相同的像素位置 (r_1, a_1) , 从而保证了主辅图像在每个像素点包含相同的散射点和不同的相位, 降低了后期主辅图像匹配造成的计算量开销和精度损失。

为了进一步说明本仿真的散射点投影方式, 及其在叠掩处的仿真方式, 给出图3所示投影几何。设地面、墙面、屋顶上3个叠掩点 P_1, P_2, P_3 距离主雷达斜距均为 r_1 , 3个点的散射系数 A_1, A_2, A_3 由POV-Ray根据物理光学法计算得到, 其主图像中投影至 (r_1, a_1) 像素, 也即得到主图像中该像素的值为

$$S_m(r_1, a_1) = \sum_{i=1}^3 A_i e^{-j \frac{4\pi r_1}{\lambda}} \quad (5)$$

P_1, P_2, P_3 到辅雷达的距离分别为 r_{21}, r_{22}, r_{23} , 由于相比于斜距而言基线非常短, r_{21}, r_{22}, r_{23} 之间的差异非常小, 不会超过1个距离门, 也即在辅图像中该3点仍然叠掩在同一个像素。为了避免后续配准步骤, 也将其投影至辅图像中与主图像相同的像素位置 (r_1, a_1) , 辅图像中的像素值为

$$S_s(r_1, a_1) = \sum_{i=1}^3 A'_i e^{-j \frac{4\pi r_{2i}}{\lambda}} \quad (6)$$

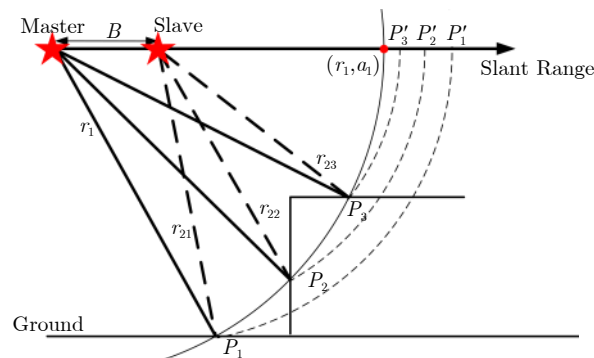


图3 散射点投影几何

Fig. 3 The projection geometry of scattering points

其中, A'_1, A'_2, A'_3 为辅图像中各叠掩成分的散射系数, 考虑叠加噪声的不同, 其与主图像散射系数略有差异。得到上述主辅图像后, 可直接进行共轭相乘, 得到干涉相位图。

由此可见, 相比于直接仿真相位图的方法而言, 本方法可以仿真叠掩, 并保留了主辅图像叠掩中各成分的相位历程差异。

2.2 叠掩成分分析

本方法通过POV-Ray进行仿真时, 可以得到射线的散射次数, 因此将散射点投影至斜距-方位平面时, 可得到不同散射次数的成像结果, 用以分析复杂目标的多次散射特性。与此同时, 还可分析得到每个像素处的叠掩成分数目。叠掩即不同的地物散射投影至同一像素点, 通过统计投影到同一像素点的散射分量数目, 获得叠掩成分数, 可为建筑区信息提取提供辅助信息。

对于如图4所示的单栋建筑而言, 如建筑高度为 H , 沿地距方向的宽度为 W , 当入射角为 θ 时, 叠掩成分数目的变化情况可以分成如下3种情况:

当 $H > W \tan \theta$ 时, 如图4(a)所示, 叠掩成分数目依次为1次(仅地面散射)、3次(地面、墙面、屋顶散射的叠掩)、2次(地面、墙面散射的叠掩)、零次(阴影)、1次(仅地面散射);

当 $H = W \tan \theta$ 时, 如图4(b)所示, 叠掩成分数目依次为1次(仅地面散射)、3次(地面、墙面、屋顶散射的叠掩)、0次(阴影)、1次(仅地面散射);

当 $H < W \tan \theta$ 时, 如图4(c)所示, 叠掩成分数目依次为1次(仅地面散射)、3次(地面、墙面、屋顶散射的叠掩)、1次(仅屋顶散射)、0次(阴影)、1次(仅地面散射)。

然而, 如直接基于POV-Ray获得的每个像素的散射点数量统计叠掩成分数并不准确, 原因在于射线追踪的散射点密度一般大于成像网格点密度。因此投影至一个像素点的散射点可能来自于不同的

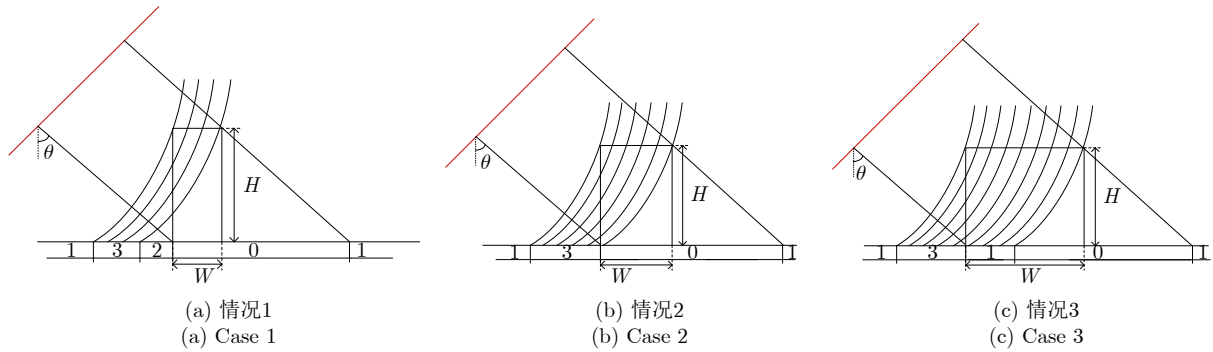


图4 叠掩成分数目分析示意图

Fig. 4 Illustration for the number of layover contributors

地物表面，也可能是一个散射点及其近邻散射点，因此需要对二者进行甄别，统计时剔除后者。本文通过计算叠掩到同一像素的若干散射点与卫星构成的张角，来判断当前散射点是来自于不同的建筑表面还是来自近邻散射点。如图5所示，假设A、B及其近邻散射点都投影至同一像素点，若叠掩区像素点来自叠掩着的不同建筑表面(地面、墙壁、屋顶)，其位于以卫星S为圆心、斜距长为半径的圆上，如A、B两点，那么叠掩点的连线AB与S构成的三角形为锐角三角形；而若叠掩区像素点来自点A和近邻点A'，那么AA'与S构成的三角形为钝角。

按照上述判断方法，本文提出图6所示的叠掩成分数目的计算流程。假设m为当前即将投影至(r, a)像素的散射点，Points{(r, a)}为所有已经投影到(r, a)像素的散射点集合，n为该集中距离当前点m最近的散射点，L ∈ R^{H×W}为叠掩成分数目图，初始化为全0。关键步骤为计算三角形(S, m, n)是否为锐角三角形，若是，则叠掩成分数加一，否则不变。随后再处理下一个散射点，直至处理完全部散射点，此时获得叠掩成分数目图。

3 InSAR建筑区高程反演方法

上述仿真方法可以得到干涉复图像对、干涉相位以及对应的叠掩成分数目图，为InSAR建筑区处理方法研究提供数据支撑。对于局部某个建筑的精细分析而言，可以在建立初始三维模型获得仿真结

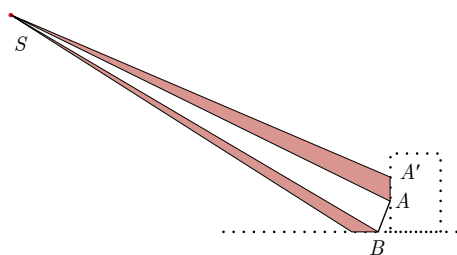


图5 叠掩区域散射点的角度关系

Fig. 5 The angle of layover points

果后，通过与实际InSAR图像和干涉相位的人工比对，不断修正三维模型，使得仿真结果逼近真实结果，从而获得该建筑的三维结构信息，但该方法不适合自动化批量处理。而传统InSAR处理在建筑区进行相位解缠时面临相位不连续、解缠基准无法确定的问题，也无法有效反演高程。为此，本文提出基于叠掩掩膜图指导的干涉相位解缠和高程反演方

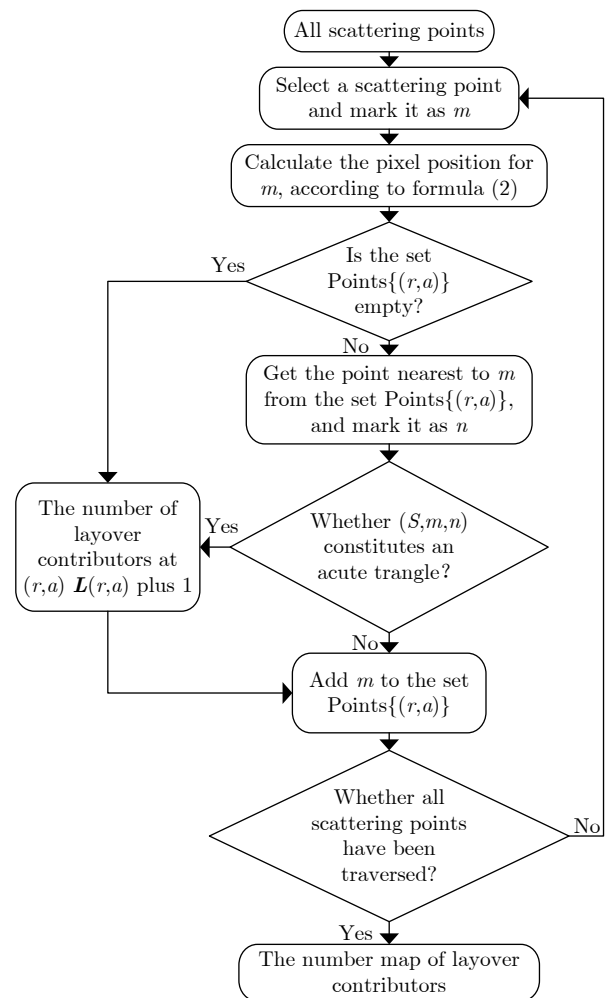


图6 叠掩成分数目计算流程

Fig. 6 Calculation method for the number of layover contributors

法。此处的叠掩掩膜图指对应于InSAR图像的区域分割标记图,标记包括4类:叠掩区(叠掩成分数目大于1)、阴影区(叠掩成分数目为0)、非叠掩地面、非叠掩建筑顶部(如图4(c)叠掩成分数目为1的屋顶部分)。关于掩膜图的获取,现已有一些基于图像来进行自动提取的研究^[22,23]。本文的仿真方法可以得到仿真图像和叠掩掩膜的真值标记图,可为该类方法提供训练数据集。下面介绍已获取叠掩掩膜图作为支撑下的高程反演方法。

3.1 叠掩掩膜指导下的高程反演流程

干涉SAR测量几何如图7所示,在重复轨道干涉测量模型中,基线 B 为两次观测的交轨基线。令 ϕ_1, ϕ_2 分别为两次观测得到的信号相位。经过相位解缠,可得到解缠相位为 ϕ

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) \quad (7)$$

根据相位 ϕ 和主图像斜距 r_1 可得到辅图像斜距 r_2 ,则 r_1, r_2 和基线 B 已知,根据余弦定理求得图7中的角度 β ,再根据 β 和已知的基线角 α 可得到角度 θ 。由成像几何得知,建筑物的高度 h 计算方法为

$$\begin{aligned} h &= H - r_1 \cos(\theta) \\ &= H - r_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \arccos\left(\frac{r_1^2 + B^2 - r_2^2}{2r_1 B}\right)\right) \end{aligned} \quad (8)$$

可见当解缠后的相位 ϕ 已知时,建筑物高度的计算方法非常明确。难点在于叠掩区的出现导致干涉相位不连续,无法准确估计相位缠绕周期数,使得解缠难以进行。但若叠掩掩膜图已知,本文提出如图8所示的叠掩区域的相位解缠流程。首先将仿真主、辅图像共轭相乘,得到干涉相位图和对应的叠掩掩膜。根据掩膜图单独分离出地面相位、叠掩区相位、非叠掩的建筑屋顶相位;然后对所分离出来的各个区域分别进行相位解缠;其中分离出来的地面区含有因阴影、叠掩而造成的空洞,通过对解

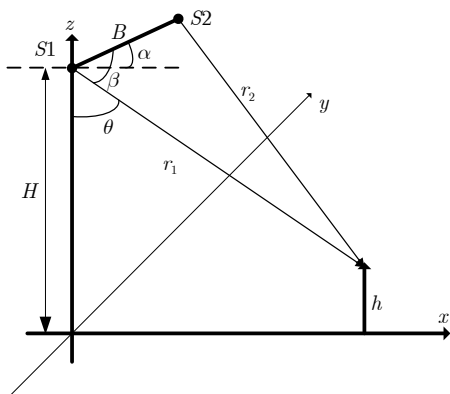


图 7 干涉SAR测量几何

Fig. 7 InSAR measurement geometry

缠相位沿距离向线性插值,补全地面相位空洞;接着根据与墙面底部相交处的地面相位确定叠掩区相位基准,并根据叠掩区中建筑顶端和非叠掩建筑屋顶的连续性,确定屋顶相位基准,最终获得相位解缠结果。上述步骤中,对分离出来的各个区域“分别进行相位解缠”的步骤,本文采用了文献^[24]提出的非连续路径可靠性排序的快速相位解缠方法,分别解缠各个区的相位。

最后,根据得到的建筑区相位解缠结果,以及主雷达位置、斜距,获得辅雷达斜距,结合基线和基线角,根据式(8)做高程解算,最终获得场景中各散射点的三维位置。

3.2 相位基准确定

上述流程中,相位基准的确定方法如图9(a)和图9(b)所示,分别对应了图4(a)和图4(c)的情况。在某一方位向上,缠绕相位如黑色线所示,独立解缠后的地面相位(蓝)、叠掩区相位(红)和建筑屋顶相位(紫)如实线所示,其中叠掩区和建筑屋顶由于缺乏基准,单独解缠后的相位与正确的解缠相位之间相差一个常数。基于地面平坦假设,对地面因建筑和阴影造成的空洞部分作相位线性插值,如灰色虚线所示。由于叠掩区墙面底部(位于叠掩区的远

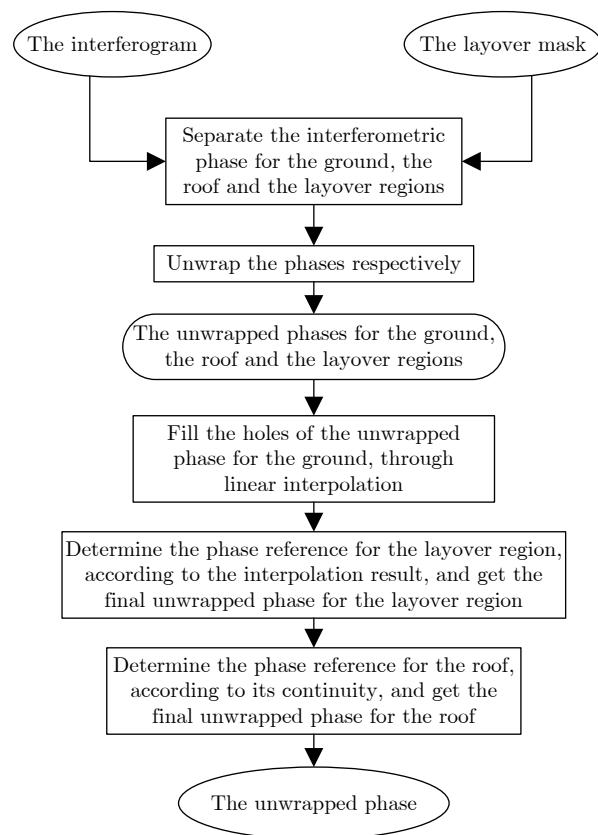


图 8 叠掩掩膜图指导下的相位解缠流程

Fig. 8 The phase-unwrapping method guided by the layover mask

距)与该处地面相位应一致,因此可以据此处地面相位确定叠掩区解缠相位基准,也即将红色实线平移为图中红色点划线。同理,对于屋顶部分而言,其解缠相位应是连续的,且屋顶与墙壁在相交处的相位应是一致的,因此屋顶解缠相位的延长线(图9(b)紫色点划线的灰色延长线)应与建筑顶部的解缠相位(图9(b)红色点划线)相交,按照该准则将图中独立解缠的屋顶相位(紫实线)通过加上相位基准平移为紫色点划线,得到最终解缠结果。

需要说明的是,图9中,本文假设地面、墙面、屋顶叠掩时,墙面散射占据主导地位,叠掩区相位变化主要由墙面散射点的斜距变化引起。因为

实际中,城区无植被的地面和建筑顶面通常比较光滑,后向散射系数较小,而墙面则因有窗棱等造成的角反射,后向散射较强,所以该假设基本符合实际情况。图9(a)中,叠掩区前半段是屋顶、墙面、地面3次叠掩的相位,后半段是墙面、地面2次叠掩的相位,相位变化率略有不同,表达了叠掩成分不同带来的区别,此处假设墙面散射占主导,因此前后两段相位变化率的差异较小。

4 实验验证

为验证本文仿真方法的正确性以及高程反演方法的有效性,本文选取两幅获取时间相差1年、具备重轨干涉能力的TerraSAR-X高分辨率图像开展实验,图像观测区域为江苏苏州工业园区,图像获取时间分别为2015年6月和2016年9月,由于间隔1年,存在较大的时间去相关,因此仅建筑物区域保留相干性,选择其中两栋相干性较好的高层建筑作为实验对象。两栋建筑分别呈现“L”形,对应的光学图像如图10(a)所示,对应TerraSAR-X的主、辅幅度图、配准结果和干涉相位如图10(b)–图10(e)所示。两幅图像对应的卫星参数和本文仿真采用的参数如表1所示。本仿真中将以地心为中心的星载成像几何转化为以目标为中心的北天东坐标系来进行仿真。根据该建筑附近地面高程的实地测量结果,地面高程为11.3344 m,根据SAR图像几何定位结果,建筑中心的经纬度为(31.2611°, 120.7760°),故以此作为仿真坐标系原点,并获得主辅雷达天线在坐标系中的位置后开展仿真。

仿真采用的模型是根据谷歌地球光学图像和实地考察获得的信息,用简单几何体近似建立的,模型如图11,从上到下,将两栋建筑及其配楼依次标记为1, 2, 3, 4。其中, 1, 2建筑为第1栋建筑的主楼和配楼, 3, 4建筑为第2栋建筑的主楼和配楼。

4.1 仿真图像和相位结果

通过调节地面、墙面、屋顶的散射参数(场景各表面散射参数参考文献[25]),本仿真方法得到的幅度图像和干涉相位分别如图12(a)和图12(b)所示。为了表明本方法相对于文献[9]方法在InSAR仿真中的优越性,图12(c)给出了采用文献[9]方法分别进行两次仿真,得到两幅复数图像,经过精细匹配后得到的干涉相位。此外,为了验证仿真的幅度图像与真实图像的相似性,将仿真幅度图像和真实图像分别用红色分量和绿色分量表示,手动配准后合成的图像如图13所示。

从上述结果可见,由于文献[9]方法独立仿真时散射点没有严格的对应关系,干涉相位会受到网格划分和散射点不一致的影响而造成相位不正确。而

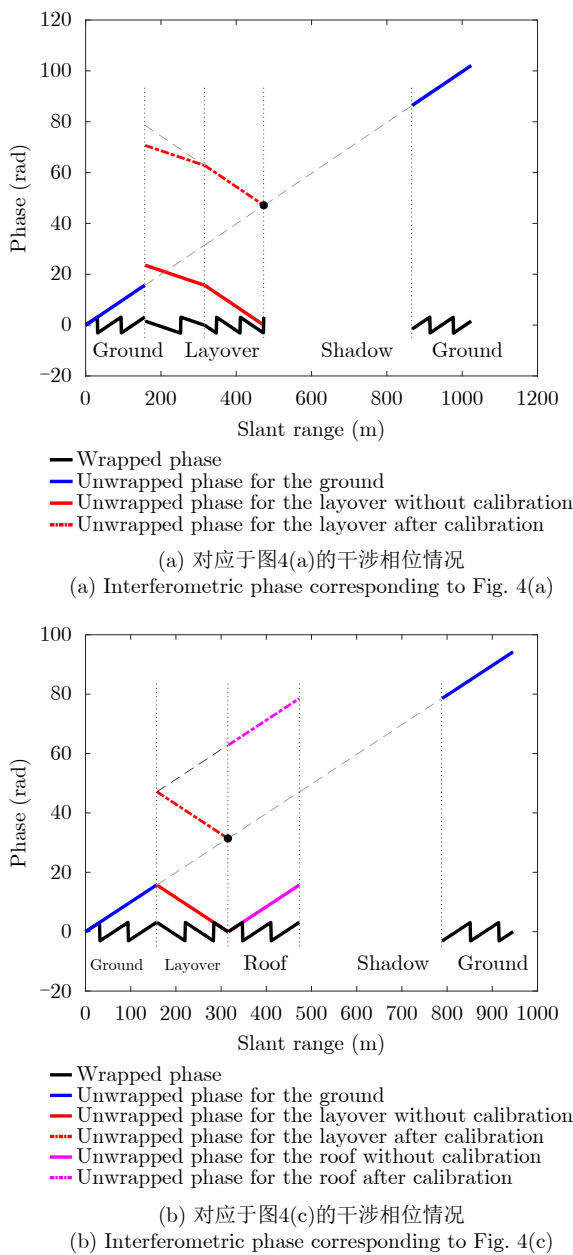


图9 解缠相位基准确定

Fig. 9 Determination of the unwrapped phase reference

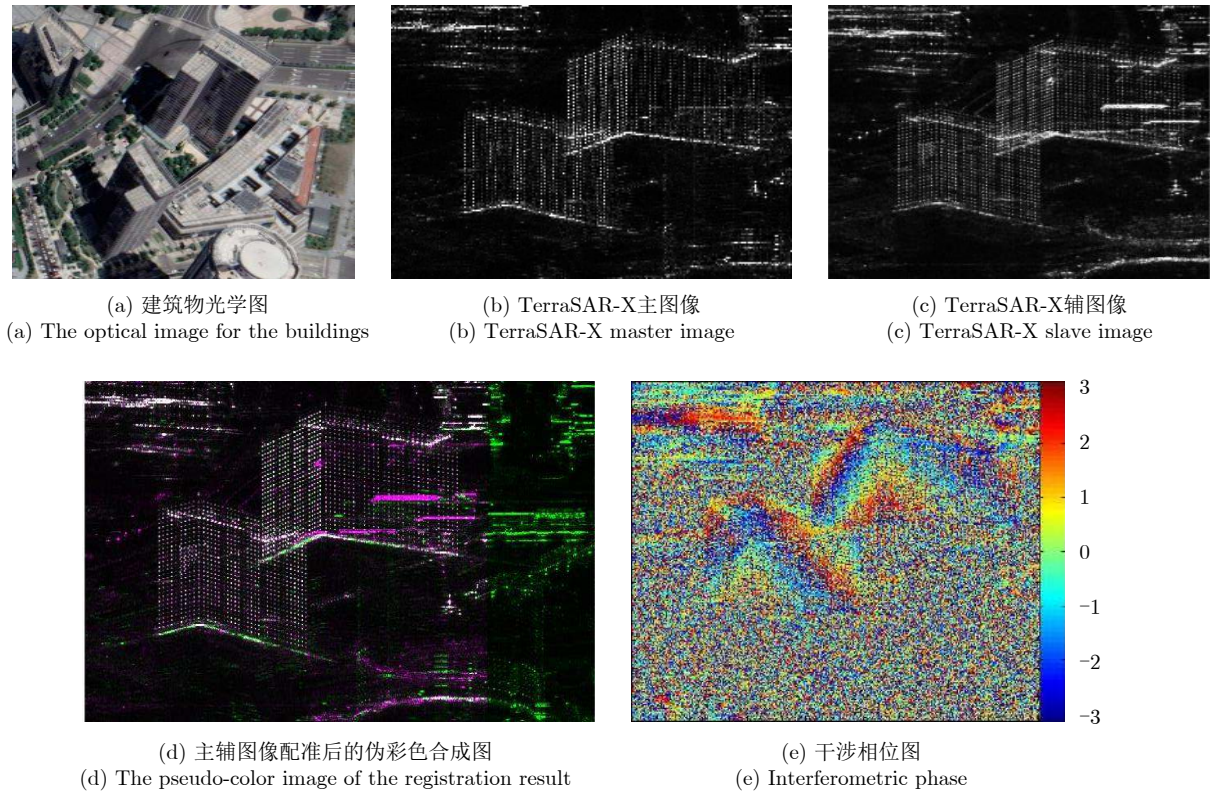


图 10 两栋建筑物的实际干涉SAR图像与相位和其光学图

Fig. 10 The real SAR image pair, interferometric phase, and optical image of the two buildings

表 1 TerraSAR参数及仿真参数

Tab. 1 Parameters of TerraSAR images and simulation

图像	参数	取值
TerraSAR 及仿真	距离向分辨率(m)	0.4547
	方位向分辨率(m)	0.1670
	主图像下视角(°)	54.52
	辅图像下视角(°)	54.49
	图像大小(距离, 方位)	(500, 600)
仿真	主雷达位置(m)	(0, 500160.3, -356368.6)
	基线向量(m)	(51.52, -188.1, -238.0)
	相位噪声模型	标准差为 $\pi/4$ 的高斯随机噪声

本文方法得到的相位则比较接近真实相位，仿真图像的几何结构也与真实SAR图像具有较高的相似性，尤其，图12(a)中红色圈出的部分与真实图像中的表现非常吻合，验证了仿真的正确性，同时说明本仿真对于理解建筑区复杂散射的成因有支撑作用。此外，需要说明的是，由于真实场景中建筑墙壁上存在较多窗户，存在小型三面角结构，产生的散射较强，而在本实验中采用简单几何体近似建模，因此并没有体现这些离散散射点，但这并不妨碍本仿真方法有效性的验证。

4.2 叠掩成分数目

本仿真得到了叠掩成分数目图如图14(a)所示。

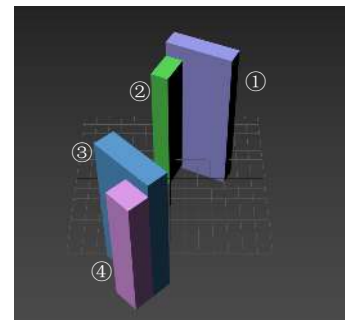


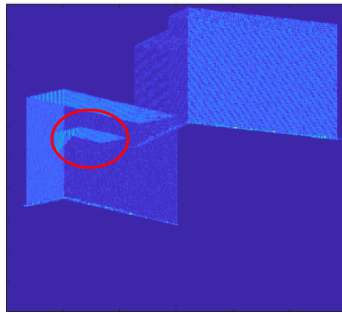
图 11 建筑三维模型

Fig. 11 3D model for the buildings

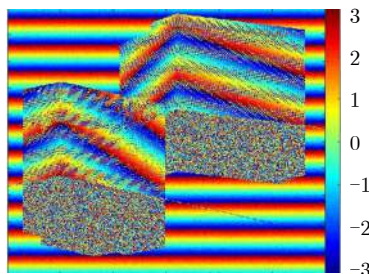
对其中虚线所在一条方位线进行叠掩成分数的分析，如图14(b)所示。该方位向上两栋高层建筑发生遮挡，因此叠掩情况较为复杂。从近距到远距，叠掩成分数目依次为1(地面)、3(地面，第1栋建筑的墙面和屋顶)、2(地面，第1栋建筑的墙面)、4(地面，第1栋建筑的墙面，第2栋建筑的墙面和屋顶)、3(地面，第1栋建筑的墙面，第2栋建筑的墙面)、1(第2栋建筑的墙面)、2(地面、第2栋建筑的墙面)、0(阴影)以及1(地面)。

4.3 高程反演

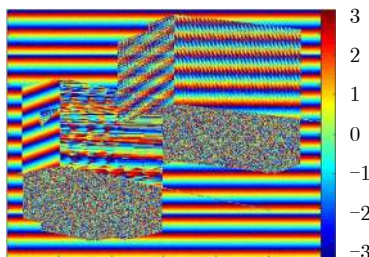
为了验证本文基于叠掩掩膜指导的高程反演方法的可行性，本文用仿真得到的叠掩掩膜图作为支撑输入进行实验。实际数据处理中，可借鉴文献[22,23]



(a) 仿真得到的幅度图像
(a) The amplitude image obtained by simulation



(b) 仿真图像的干涉相位
(b) The interferometric phase obtained by simulation



(c) 文献[9]方法得到的干涉相位
(c) The interferometric phase obtained by Ref. [9]

图 12 建筑仿真图像

Fig. 12 The simulation results of the buildings

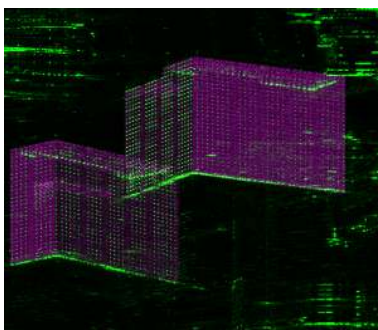
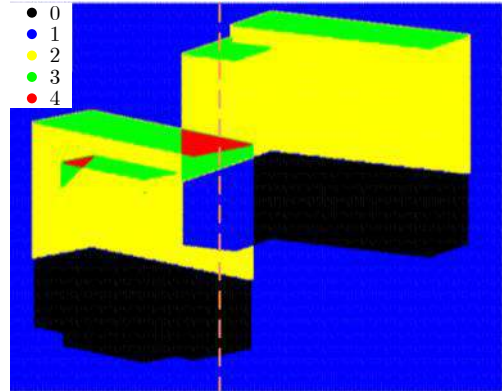


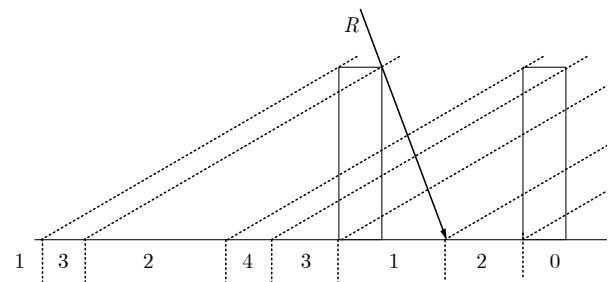
图 13 仿真图像与实际图像配准后伪彩色显示结果

Fig. 13 The pseudo-color image for the registration result of the simulated and the real images

等方法, 通过图像分割来得到叠掩掩膜图。但在本文中, 实验目的是验证相位解缠进而高程反演方法的正确性, 因此采用了仿真得到的非常理想掩膜图。



(a) 叠掩成分数目图
(a) The map of the layover contributors number



(b) 叠掩成分数目图解
(b) Illustration of the number of layover contributors

图 14 叠掩成分数目分析

Fig. 14 Analysis of the number of layover contributors

首先对仿真数据进行解缠处理, 由于该两栋建筑虽有相互遮挡, 但遮挡部分占比较小, 并且本文目前主要探讨了独栋建筑的情况。因此, 我们对两栋建筑单独进行了仿真, 得到了独栋的相位, 并分别进行了解缠和高程反演, 得到结果如图15所示。其中, 图15(b)为图15(a)对应的叠掩成分数目图, 图15(c)为分别解缠各区域相位、但未给叠掩区确定相位基准的结果, 图15(d)为按照图9方法逐个方位向为叠掩区确定相位基准后的结果, 可以发现, 确定基准后建筑底部的相位与周围地面一致。同时为了便于比较, 图15(e)给出了采用文献[24]方法得到的解缠相位。可见, 由于叠掩造成的干涉相位不连续, 直接用文献[24]方法解缠得到的结果是错误的, 不能得到建筑墙面粉位的正确值; 并且由于部分墙壁与周围地面的干涉相位值恰好一致(图15(e)红色箭头所示), 按可靠性指引进行解缠时, 连接处的地面相位以墙面相位为基准解缠, 导致地面相位也未能得到正确结果。而本文提出的方法通过分区独立解缠和相位基准正确给定, 得到了正确的解缠相位, 如图15(d)所示, 从而正确地恢复了建筑墙面的高度, 如图15(f)和图15(g)。

接着对图10(e)的实际干涉数据的相位进行解缠和高程反演实验, 我们也对两栋建筑进行了分离

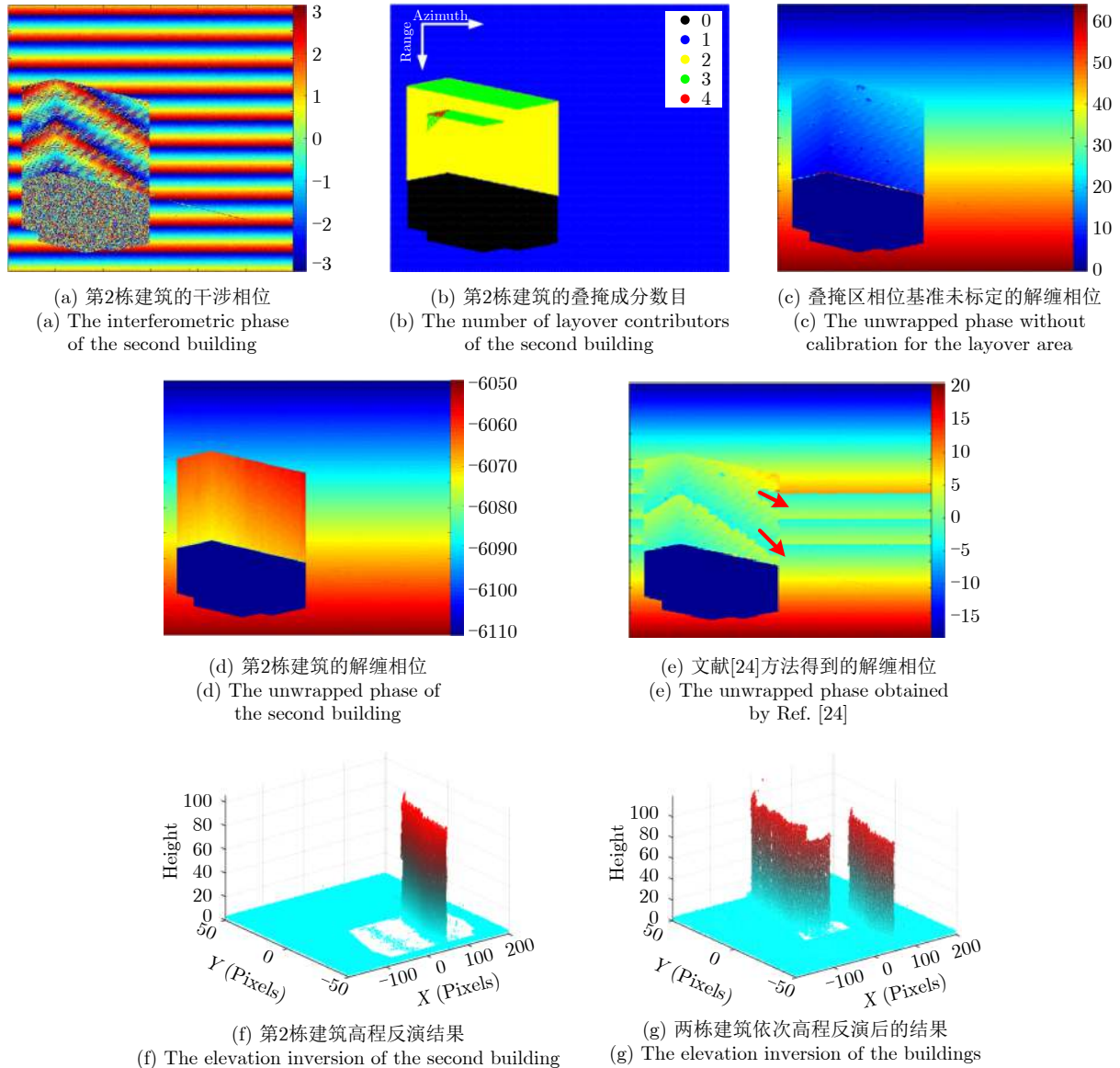


图 15 对本文InSAR仿真数据的建筑高程反演结果

Fig. 15 The elevation inversion results of the simulated images using our method

和单独解缠，相位解缠结果和高程反演结果如图16所示。

表2罗列了上述高程反演得到建筑高度的定量结果，其中建筑4由于被建筑3遮挡严重(图12(a)中红框标出部分为建筑4)，无法重建高程，故表中

表 2 建筑物高程反演结果

Tab. 2 The elevation inversion results of the buildings

建筑序号	三维模型建筑高度(m)	仿真图像重建高度		真实图像重建高度	
		均值(m)	标准差(m)	均值(m)	标准差(m)
1	100.5	101.39	1.20	99.75	4.48
2	91.6	92.84	2.56	93.69	2.31
3	98.4	99.90	2.35	99.10	3.17
4	88.3	\	\	\	\

结果为空。由图15、图16和表2的高程反演结果可见，本文提出的相位解缠基准确定方法是正确的，叠掩掩膜指导的相位解缠方法是有效的。

下一步拟基于该仿真方法构建数据集，开展叠掩掩膜自动提取的方法研究，并与本文基于叠掩指导的高程反演方法有机结合，形成适合建筑区域的InSAR高程反演方法。

5 结束语

本文提出了一种建筑物的InSAR复图像对仿真方法。本方法基于射线追踪，通过记录并复用主天线射线追踪得到的散射点位置来生成辅天线回波距离历程，从而获得干涉SAR图像对。仿真过程考虑了多次散射，相比现有方法仿真更加真实。同时，仿真中通过将散射点投影至斜距-方位平面，筛选

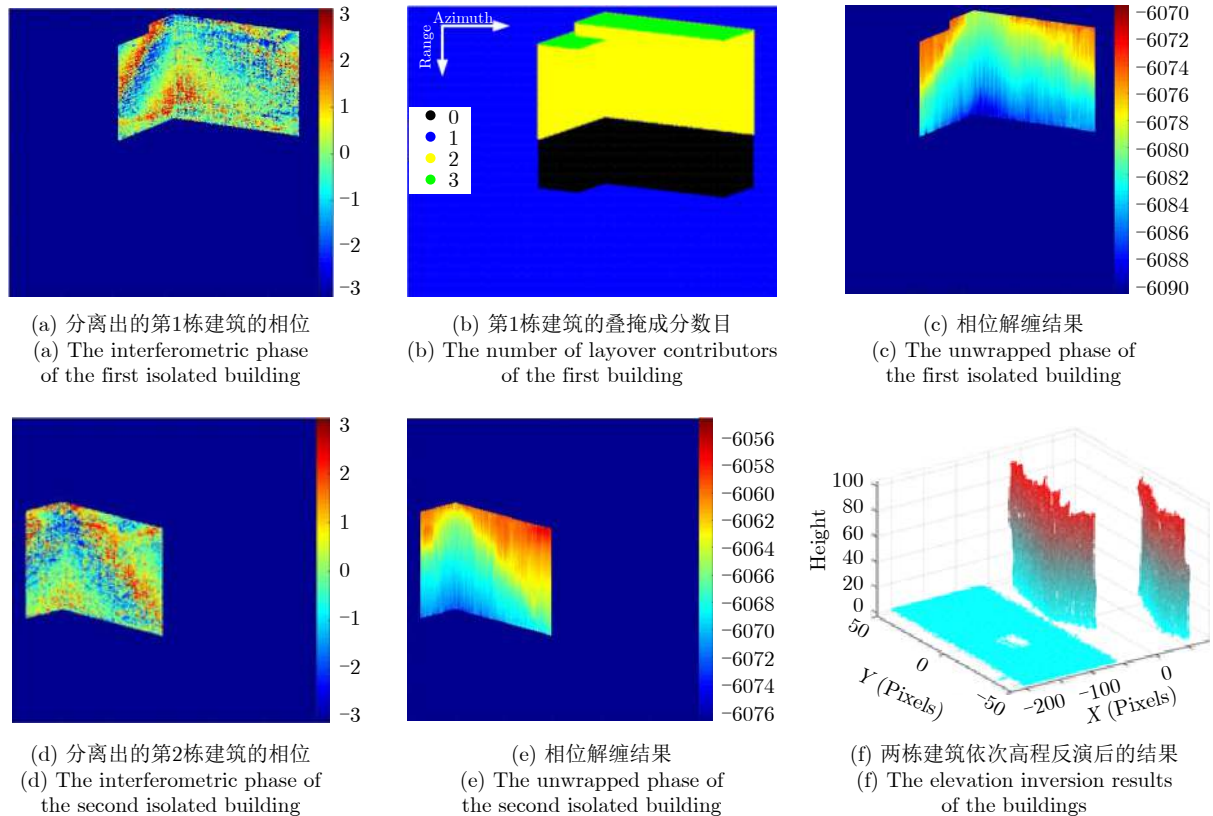


图 16 TerraSAR-X重轨干涉SAR数据的建筑高程反演结果

Fig. 16 The elevation inversion results of the TerraSAR-X InSAR images

并统计投影至同一像素的散射点数量的方法,得到叠掩成分数目图,可以为建筑区域InSAR处理方法研究提供更加充分的仿真数据和信息。在此基础上,本文针对叠掩区干涉SAR相位不连续、解缠困难的问题,提出了基于叠掩掩膜指导的相位解缠方法,给出了处理流程和相位基准确定的方法。最后,通过仿真实验与实际星载重轨干涉数据的结果对比,验证了本文仿真方法能够获得与实际数据较为接近的图像和相位仿真结果。同时基于仿真获得的掩膜图的指导,对仿真和实际数据进行了相位解缠和高程反演,得到了合理的高程反演结果,验证了高程反演方法的可行性。

后续工作将致力于叠掩掩膜图的自动生成,拟进一步提高仿真图像的相似度,搭建掩膜图生成的深度神经网络,用仿真得到的幅度图像、干涉相位作为输入,仿真得到的掩膜图作为标签,训练该深度神经网络,使其具备分割叠掩的能力,并能够应用于实际InSAR数据中实现掩膜图自动生成。

参考文献

- [1] LIU Dawei, SUN Guoqing, GUO Zhifeng, *et al.* Three-dimensional coherent radar backscatter model and simulations of scattering phase center of forest canopies[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 349–357. doi: [10.1109/TGRS.2009.2024301](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2024301).
- [2] LIU Dawei, DU Yang, SUN Guoqing, *et al.* Analysis of InSAR sensitivity to forest structure based on radar scattering model[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2008, 84: 149–171. doi: [10.2528/PIER08071802](https://doi.org/10.2528/PIER08071802).
- [3] XUE Fengli and XU Feng. Scattering verification and imaging of vegetation and its components[C]. The 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Hangzhou, China, 2018: 1–4.
- [4] XUE Fengli and XU Feng. Coherent scattering and PolinSAR imaging simulation of fractal trees[C]. 2018 China International SAR Symposium, Shanghai, China, 2018: 1–4.
- [5] XU Feng, JIN Yaqiu, and MOREIRA A. A preliminary study on SAR advanced information retrieval and scene reconstruction[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(10): 1443–1447. doi: [10.1109/LGRS.2016.2590878](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2590878).
- [6] 张红敏, 靳国旺, 徐青, 等. 多基线InSAR干涉图的直接法仿真[J]. *测绘科学技术学报*, 2010, 27(2): 127–130. doi: [10.3969/j.issn.1673-6338.2010.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6338.2010.02.014).

ZHANG Hongmin, JIN Guowang, XU Qing, *et al.* Direct algorithm for simulation of multi-baseline InSAR interferograms[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2010, 27(2): 127–130. doi: [10.3969/j.issn.1673-6338.2010.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6338.2010.02.014).

- 6338.2010.02.014.
- [7] 靳国旺, 徐青, 张红敏. 合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 176–179.
JIN Guowang, XU Qing, and ZHANG Hongmin. Synthetic Aperture Radar Interferometry[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 176–179.
- [8] AUER S, HINZ S, BAMLER R, *et al.* Ray-tracing simulation techniques for understanding high-resolution SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1445–1456. doi: [10.1109/TGRS.2009.2029339](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2029339).
- [9] AUER S. 3D synthetic aperture radar simulation for interpreting complex urban reflection scenarios[D]. [Ph.D. dissertation], Technische Universität München, 2011: 62–76.
- [10] HAMMER H and SCHULZ K. SAR-simulation of large urban scenes using an extended ray tracing approach[C]. 2011 Joint Urban Remote Sensing Event, Munich, Germany, 2011: 289–292.
- [11] 孙造宇, 梁甸农, 张永胜. 星载InSAR系统DEM重建及其误差分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1336–1340. doi: [10.3724/SP.J.1146.2006.01735](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2006.01735).
SUN Zaoyu, LIANG Diannong, and ZHANG Yongsheng. Method and error analysis of DEM reconstruction for spaceborne InSAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(6): 1336–1340. doi: [10.3724/SP.J.1146.2006.01735](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2006.01735).
- [12] 林雪, 李曾玺, 李芳芳, 等. 一种自适应迭代的非局部干涉相位滤波方法[J]. 雷达学报, 2014, 3(2): 166–175. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.13123](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.13123).
LIN Xue, LI Zengxi, LI Fangfang, *et al.* An adaptive iterated nonlocal interferometry filtering method[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(2): 166–175. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.13123](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.13123).
- [13] 靳国旺. InSAR获取高精度DEM关键处理技术研究[D]. [博士学位论文], 解放军信息工程大学, 2007: 141–146.
JIN Guowang. Research on key processing techniques for deriving accurate DEM from InSAR[D]. [Ph.D. dissertation], Information Engineering University, 2007: 141–146.
- [14] 王彦兵, 洪伟, 李小娟, 等. 基于D-InSAR技术的北京城区地面沉降监测[J]. 测绘通报, 2016(5): 66–68, 79.
WANG Yanbing, HONG Wei, LI Xiaojuan, *et al.* Monitoring of land subsidence in Beijing based on D-InSAR[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(5): 66–68, 79.
- [15] 王青松, 时信华, 黄海风, 等. 星载干涉SAR阴影及叠掩区域相位重构方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 699–702.
WANG Qingsong, SHI Xinhua, HUANG Haifeng, *et al.* Method of spaceborne InSAR shadow and layover phase reconstruction[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(4): 699–702.
- [16] CELLIER F and COLIN E. Building height estimation using fine analysis of altimetric mixtures in layover areas on polarimetric interferometric X-band SAR images[C]. 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Denver, USA, 2006: 4004–4007.
- [17] LIU Bin, TUPIN F, LIU Xingzhao, *et al.* Characterization and extraction of building layovers in urban areas using high resolution SAR imagery[C]. 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS, Melbourne, Australia, 2013: 895–898.
- [18] 张同同, 杨红磊, 李东明, 等. SAR影像中叠掩与阴影区域的识别——以湖北巴东为例[J]. 测绘通报, 2019(11): 85–88.
ZHANG Tongtong, YANG Honglei, LI Dongming, *et al.* Identification of layover and shadows regions in SAR images——Taking Badong as an example[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(11): 85–88.
- [19] ROSSI C and EINEDER M. High-resolution InSAR building layovers detection and exploitation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(12): 6457–6468. doi: [10.1109/TGRS.2015.2440913](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2440913).
- [20] YU Hanwen, LAN Yang, YUAN Zhihui, *et al.* Phase unwrapping in InSAR: A review[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2019, 7(1): 40–58. doi: [10.1109/MGRS.2018.2873644](https://doi.org/10.1109/MGRS.2018.2873644).
- [21] POV-Ray 3.6.1 documentation[EB/OL]. <http://www.povray.org/documentation/index-3.6.php>.
- [22] CHEN Jiankun, PENG Lingxiao, QIU Xiaolan, *et al.* A 3D building reconstruction method for SAR images based on deep neural network[J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2019, 49(12): 1606–1625.
- [23] SUN Y, HUA Y, MOU L, *et al.* Large-scale building height estimation from single VHR SAR image using fully convolutional network and GIS building footprints[C]. 2019 Joint Urban Remote Sensing Event, Vannes, France, 2019: 1–4.
- [24] HERRÁEZ M A, BURTON D R, LALOR M J, *et al.* Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path[J]. *Applied Optics*, 2003, 41(35): 7437–7444.
- [25] NIU Shengren, QIU Xiaolan, LEI Bin, *et al.* Parameter prediction method of SAR target simulation based on convolutional neural networks[C]. The 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2018: 1–5.

作者简介



王 超(1995-), 男, 籍贯山西, 天津大学学士, 中国科学院空天信息创新研究院在读硕士生, 研究方向为InSAR典型建筑三维重建。

E-mail: wangchao173@mails.ucas.edu.cn



李芳芳(1986-), 女, 籍贯山西, 中国科学院空天信息创新研究院副研究员, 研究方向为干涉合成孔径雷达信号处理、SAR三维成像。

E-mail: ffl1@mail.ie.ac.cn



仇晓兰(1982-), 女, 籍贯江苏, 中国科学院空天信息创新研究院研究员, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达成像处理与应用、遥感大数据分析与信息提取。

E-mail: xlqiu@mail.ie.ac.cn



雷 斌(1978-), 男, 中国科学院空天信息创新研究院研究员, 研究方向为合成孔径雷达数据处理与图像理解、遥感图像处理与信息提取、空间信息处理系统体系结构。

E-mail: leibin@mail.ie.ac.cn