

DOI:10.13203/j.whugis20190222



文章编号:1671-8860(2020)11-1717-11

# 顾及叠掩与阴影的多通道 InSAR 干涉图 仿真方法

袁志辉<sup>1</sup> 谷翼策<sup>1</sup> 邢学敏<sup>2</sup> 陈立福<sup>1</sup> 俞晓莹<sup>3</sup>

1 长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南 长沙,410114

2 长沙理工大学交通运输工程学院,湖南 长沙,410114

3 长沙理工大学建筑学院,湖南 长沙,410114

**摘要:**为了在仿真的干涉图中较好地模拟合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)图像中存在的叠掩和阴影现象,为多通道干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)系统设计及相关算法的研究提供合适的数据源,提出了一种顾及叠掩与阴影情况的多通道 InSAR 干涉图仿真方法。首先,根据已知的数字高程模型(digital elevation model, DEM)和多通道 InSAR 系统参数进行计算,获得各个干涉通道对应的真实干涉相位;接着,根据干涉相位的概率密度函数生成相应的相位噪声加入到真实干涉相位中;然后,将叠掩部分的干涉相位进行加权叠加,并将高斯白噪声附加到阴影部分,从而得到顾及叠掩与阴影的多通道 InSAR 干涉相位图。利用 3 组不同的 DEM 进行仿真实验并获得了相应的多通道 InSAR 干涉图,验证了该方法的有效性。仿真结果及相关分析表明,该方法简单快捷,且考虑到了叠掩及阴影对干涉相位的影响,可为多通道 InSAR 技术及相关算法的研究提供更符合实际情况的仿真数据。

**关键词:**干涉合成孔径雷达(InSAR);多通道(多基线/多频率);干涉图仿真;叠掩;阴影

中图分类号:P237 文献标志码:A

多通道(多基线/多频率)干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术<sup>[1-2]</sup>是此前的单基线 InSAR 技术理论上扩展而来的一种新的干涉测量技术,被誉为最具潜力的对地观测技术之一。由于它克服或减少了目标高度急剧变化、较大外界噪声干扰和叠掩等因素的影响,可综合利用长基线干涉数据和短基线干涉数据的优点,能够获取高精度、高可靠性的数字高程模型(digital elevation model, DEM)<sup>[3]</sup>,提高了 InSAR 技术对复杂地形的测绘精度,近年来已成为 InSAR 研究领域的一个热点话题和重点探究方向<sup>[4]</sup>。然而,目前国内外能够搜寻到的真实多通道 InSAR 方面的合适数据较为稀少,而使用实际系统又代价较高,数据不一定能够满足人们对这一方向进行理论研究的要求,通过 InSAR 数据仿真这一途径与方式来获得所需的数据不失为一种经济有效的方案。另外,因为可以控制调节系统具体参数并预知其可能产

生的结果,仿真的 InSAR 数据对于各种算法在性能比较和定量分析等方面具有重要意义,人们对这一方向日益关注。

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)的成像原理决定了 SAR 图像是在斜距平面上表达的。因此,在 SAR 图像中,当地面场景的迎坡坡度过大时,具有相同斜距的不同地物目标点将被映射到同一距离-多普勒单元内,它们的反射回波将重叠,对应的 SAR 图像和 InSAR 干涉相位会出现混叠,这种现象被称为叠掩<sup>[5-6]</sup>,在山区和城市的陡峭区域中可以很容易地看到。如果直接对叠掩区域进行相位解缠,会导致叠掩区在解缠定位后出现顶底倒置的现象,造成高度估计误差。而且解缠阶段的误差会不断积累,从而对相邻正常区域产生较大的影响。另外,陡峭地形还会对背坡区域形成遮挡,导致一些物体点被遮蔽,雷达无法接收到相应的地表回波信息,从而造成 SAR 图像中出现暗区,这种现象被称为

收稿日期:2019-05-28

项目资助:国家自然科学基金(61701047,41701536);湖南省自然科学基金(2019JJ50639,2017JJ3322);湖南省教育厅基金(18A148)。

第一作者:袁志辉,博士,主要研究方向为信号处理、合成孔径雷达干涉测量应用、相位解缠、高分辨率数字高程模型生成和算法设计。

yuanzhihui@csust.edu.cn

阴影<sup>[7]</sup>。在阴影区域的雷达回波信号中,除了热噪声或附近强回波的相干斑噪声外没有其他信号,因而它们的高程信息无法直接由InSAR技术得出。基于以上分析,应该对叠掩和阴影区进行检测和专门处理,以便更好地应用InSAR技术。到目前为止,人们已经做了大量的工作来检测叠掩和阴影区域,主要可以分为两种方法<sup>[8]</sup>:一种是基于图像本身的方法,另一种是基于阵列信号处理的方法。这两种方法均须用到SAR图像或干涉图中的相关信息。而对于InSAR干涉图仿真来说,由于系统参数及DEM均为已知量,因而可以直接根据几何关系来确定叠掩区和阴影区的位置。

在InSAR干涉图仿真研究方面,目前大部分是在单基线干涉条件下实现的<sup>[9]</sup>,而由于单基线InSAR只能得到一个干涉相位,故无法完成解叠掩。至于多通道InSAR数据仿真方面的研究,其相关资料和文献还十分有限。其中,文献[10]提供了一种采用Cholesky分解原理在3个天线的情形下产生复数干涉图的方法。在多基线相位解缠算法的仿真验证实验中<sup>[11]</sup>,此法已经被成功运用;文献[12]借用摄影测量中的影像正射纠正思想分别对多基线InSAR干涉图进行了直接法与间接法两种仿真实验方案的设计,但这种方法必须将检测范围内每一个点的像坐标和位置坐标都计算出来,其过程比较繁杂;文献[13]虽然理论上精度较高,但其理想干涉量在实际应用的过程中必须进行全场景逐点计算,运算量大,且随着仿真场景的增加,耗时也会迅速增加。其余相关文章也有运用了多通道InSAR仿真数据进行实验的,但是均未介绍详细的仿真流程及其相关技术细节。文献[14]提出了一种基于前向地理编码的多基线干涉相位图快速仿真方法,而文献[15]则详细介绍了一种基于舍选法的干涉相位仿真方法,并在文献[16-17]中得到了应用。以上方法均未涉及到叠掩区和阴影区的干涉相位仿真,存在一定的局限性。

InSAR干涉信号仿真是进行InSAR干涉测量信号处理的重要前提。精简多通道InSAR仿真实验的环节,为多通道InSAR技术的研究提供具有可控性参数的仿真数据是十分必要的。考虑到上述仿真方法的局限性,本文提出了一种顾及叠掩和阴影等影响因素的多通道InSAR干涉图仿真方法。该方法首先通过对已知的DEM与多通道InSAR系统的具体参数进行计算,获得各

个干涉通道的真实干涉相位;接着根据干涉相位的概率密度函数生成相应的相位噪声加入到真实干涉相位中;然后将叠掩部分的干涉相位进行加权叠加,并将高斯白噪声附加到阴影部分,从而得到顾及叠掩与阴影的多通道InSAR干涉相位图。对仿真结果进行分析可知,此方法简单快捷,能够为各种多通道InSAR研究提供适合的仿真数据,以便进行定性和定量的比较评估。

## 1 叠掩和阴影的检测

### 1.1 叠掩和阴影的形成原因

在陡峭的山区和城市中,相同斜距内的目标点的反射信号将被映射到SAR图像中的同一距离-多谱勒单元,使得这些信号的干涉相位重叠在一起而导致叠掩现象的产生。此外,在这些地形中,一些目标点可能被山脉或建筑物遮蔽,使得雷达无法接收到相应的地表信息,这将导致SAR图像中出现阴影。图1给出了叠掩和阴影形成的几何原理示意图。其中,S表示SAR天线相位中心,H表示SAR天线的高度,3个坐标轴分别表示斜距向、地距向和高度向, $P_1, P_2 \dots P_5$ 为地面上5个不同位置的点目标,它们对应的斜距分别为 $r_1, r_2 \dots r_5$ ,地距分别为 $y_1, y_2 \dots y_5$ ,高度分别为 $h_1, h_2 \dots h_5$ , $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_5$ 为SAR天线相位中心到这5个点目标之间的下视角。 $P_1, P_2$ 和 $P_3$ 虽然是地面上3个不同的点目标,但根据SAR的成像原理可知,由于 $r_1 = r_2 = r_3$ ,它们将被投影到斜距向r的同一个斜距分辨单元中,因此来自 $P_1, P_2$ 和 $P_3$ 的干涉相位信息将重叠在同一个斜距分辨单元而形成叠掩。叠掩区范围如图1中短粗实线部分所示。而 $y_4$ 至 $y_5$ 之间的区域则代表了由于背坡坡度过大而被遮蔽的点,投影到斜距向r以后将在SAR图像中形成阴影区,如图1中长粗实线部分所示。

文献[18]中讨论了叠掩和阴影的形成及其对干涉图的影响,指出干涉图在叠掩区表现为噪声,或者出现伴有逆条纹频率的模糊情况,而在阴影区则表现为随机噪声。

根据图1所示的几何关系,在同一条距离线上从近到远依次将每个目标点标记为 $i=1, 2 \dots$ ,且其对应的地距、高度、下视角和斜距分别用 $y_i, h_i, \theta_i$ 和 $r_i$ 表示,则形成叠掩的条件为存在两个及以上的目标点投影到了同一个斜距分辨单元中,即有:

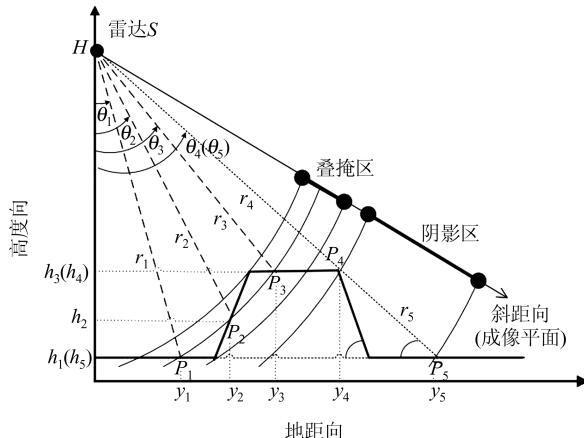


图 1 叠掩与阴影的形成

Fig.1 Formation of Layover and Shadow

$$|r_i - r_j| \leq \frac{\delta_r}{2}, i \neq j \quad (1)$$

式中,  $\delta_r$  为斜距采样间隔(或斜距分辨率), 且斜距  $r_i$  的计算公式为:

$$r_i = \sqrt{(H - h_i)^2 + y_i^2} \quad (2)$$

而形成阴影的条件则为:

$$|\theta_i - \theta_j| \leq \frac{\delta_\theta}{2}, i \neq j \quad (3)$$

式中,  $\delta_\theta$  为角分辨率, 下视角  $\theta_i$  的计算公式为:

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{y_i}{H - h_i}\right) \quad (4)$$

## 1.2 叠掩和阴影的检测方法

由于已知 InSAR 系统参数和各目标点对应的地距、高度(即 DEM)等信息, 因而可直接根据图 1 所示的几何关系分别利用式(1)和式(3)判断出叠掩区和阴影区的位置, 称之为几何关系判别法。

1) 对于阴影区的具体判别过程为:

(1) 求出距离向上相邻像素之间的高度差, 大于等于零时判为迎坡像素, 小于零时判为背坡像素;

(2) 对于背坡像素, 根据式(4)计算其对应的视角, 同时求出后面其他像素与该背坡像素形成的直线与高度向之间的夹角, 比较该夹角与所得视角之间的大小, 小于视角时视为阴影区像素, 否则视为正常像素。

2) 对于叠掩区的具体判别过程为:

(1) 利用式(2)根据 DEM 和 InSAR 系统参数计算每个地距分辨单元对应的斜距;

(2) 在每条距离线上根据式(1)寻找同时存在于同一个斜距分辨单元内的两个及以上的目标点, 并将其视为叠掩像素。

需要注意的是, 由于在阴影区也可能有像素叠掩的几何关系存在, 因此在具体执行时应先判别出阴影区, 然后再在其他区域进行叠掩区判别。

## 2 仿真模型与方法

### 2.1 多通道 InSAR 系统仿真模型

图 2 是多基线 InSAR 系统的几何示意图, 其中,  $A_0, A_1 \dots A_N$  为分布在与航向方向相互垂直的平面上的 SAR 天线相位中心,  $\alpha$  表示水平基线角,  $A_1 \dots A_N$  和  $A_0$  形成干涉基线  $B_1 \dots B_N$ ,  $B_{\perp 1} \dots B_{\perp N}$  为相应的垂直基线, 其他参数的含义见图 1 的解释。如果系统的工作模式为乒乓模式, 那么可以通过 InSAR 系统的几何参数和干涉原理得到第  $i$  个天线与主天线之间产生的干涉相位为:

$$\varphi_i = \frac{4\pi}{\lambda} (r_0 - r_i) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_i \quad (5)$$

式中,  $\varphi_i$  为第  $i$  个干涉通道的干涉相位;  $\lambda$  为系统的工作波长;  $\Delta r_i$  为点  $P$  到两天线之间的斜距之差。

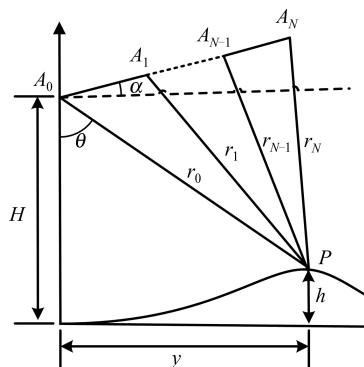


图 2 多基线 InSAR 系统几何示意图

Fig.2 Geometry Diagram of Multi-baseline InSAR System

又由图 2 的几何关系可知:

$$r_i^2 = r_0^2 + B_i^2 - 2r_0 B_i \sin(\theta - \alpha) \quad (6)$$

$$h = H - r_0 \cos \theta \quad (7)$$

联立式(5)~(7), 则得出地形高程与干涉相位之间的关系为:

$$\varphi_i = \frac{4\pi B_i}{\lambda} \left\{ \sin [\arccos(\frac{H-h}{r_0}) - \alpha] - \frac{B_i}{2r_0} \right\} \quad (8)$$

所以, 仅需要拥有真实地形的数字高程模型和相关 InSAR 几何参数就可以仿真出不同通道相应的真实干涉相位  $\varphi_i$ 。

另外, 现在大多数文献中的方法都是直接模拟产生去平地效应之后的真实干涉相位:

$$\bar{\varphi}_i = \frac{2\pi}{h_{a_i}} h = \frac{4\pi B_{\perp i}}{\lambda r_0 \sin\theta} h \quad (9)$$

式中,  $\bar{\varphi}_i$  为第  $i$  个干涉通道去除平地效应后的真实干涉相位;  $h_{a_i}$  为第  $i$  个干涉通道对应的高度模糊数, 其表达式为:

$$h_{a_i} = \frac{\lambda r_0 \sin\theta}{2B_{\perp i}} \quad (10)$$

多频率 InSAR 系统和多基线 InSAR 系统类

$$\begin{aligned} p(\phi_i; \gamma_i, L, \varphi_i) = & \frac{(1 - |\gamma_i|^2)^L}{2\pi} \left\{ \frac{\Gamma(2L-1)}{[\Gamma(L)]^2 2^{2(L-1)}} \times \right. \\ & \left[ \frac{(2L-1)\beta_i}{(1-\beta_i^2)^{L+0.5}} \left( \frac{\pi}{2} + \arcsin\beta_i \right) + \frac{1}{(1-\beta_i^2)^L} \right] + \\ & \frac{1}{(2L-1)} \sum_{r=0}^{L-2} \frac{\Gamma(L-0.5)}{\Gamma(L-0.5-r)} \frac{\Gamma(L-1-r)}{\Gamma(L-1)} \frac{1+(2L+1)\beta_i^2}{(1-\beta_i^2)^{L+2}} \left. \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $\phi_i$  是存在有一定噪声的干涉相位;  $\gamma_i$  是相干系数;  $L$  是多视视数;  $\Gamma(\cdot)$  是 gamma 函数;  $\beta_i = |\gamma_i| \cos(\phi_i - \varphi_i)$ 。假设其处于单视状态下, 则式(11)可变为<sup>[20]</sup>:

$$\begin{aligned} p(\phi_i; \gamma_i, \varphi_i) = & \frac{1 - |\gamma_i|^2}{2\pi} \frac{1}{1 - |\gamma_i|^2 \cos^2(\phi_i - \varphi_i)} \times \\ & \left[ 1 + \frac{|\gamma_i| \cos(\phi_i - \varphi_i) \arccos(-|\gamma_i| \cos(\phi_i - \varphi_i))}{\sqrt{1 - |\gamma_i|^2 \cos^2(\phi_i - \varphi_i)}} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

设干涉相位噪声为  $n_i = \phi_i - \varphi_i$ , 通过式(11)和式(12)则可获得相位噪声的概率密度函数  $p(n_i; \gamma_i, L)$ , 因此依照这个概率密度函数就可以产生对应的相位噪声。

### 2.3 相干系数计算模型

相干系数是 SAR 干涉测量中十分重要的一个量值, 复数影像之间用相干系数来衡量影像之间的相似程度, 同时它也表示为局部干涉条纹图中测量干涉相位与真实干涉相位之间的近似度。若想获得其干涉相位噪声的概率密度分布函数, 则必须考虑其相干系数。不同的去相干源均是不同原因产生的, 彼此互不相关, 所以总的相干系数计算公式<sup>[20]</sup>可以用它们的乘积来表示:

$$\gamma_{\text{tot}} = \gamma_{\text{geom}} \times \gamma_{\text{DC}} \times \gamma_{\text{vol}} \times \gamma_{\text{thermal}} \times \gamma_{\text{temporal}} \times \gamma_{\text{processing}} \quad (13)$$

式中,  $\gamma_{\text{geom}}$ 、 $\gamma_{\text{DC}}$ 、 $\gamma_{\text{vol}}$ 、 $\gamma_{\text{thermal}}$ 、 $\gamma_{\text{temporal}}$  和  $\gamma_{\text{processing}}$  分别表示几何去相干、多谱勒质心去相干、体散射去相干、热噪声去相干、时间去相干和数据处理去相干。对于研究者而言, 可以依据自己实验目的的不同要求在干涉图仿真中加入不同的去相干源。关于多通道 InSAR 测量技术, 当前主要的研究方向还是聚焦于算法性能分析, 所以通常情况下只

似, 仅仅是将已述公式里的波长的数目改成  $N$ , 而基线不进行改变。

### 2.2 干涉相位噪声仿真模型

由于各种去相关因素的影响, 实际干涉 SAR 系统所得到的干涉相位并非仅仅是与真实地形高度相关的干涉相位, 其中还含有噪声, 而且表现出统计特性, 它的概率密度函数可以表示为<sup>[19]</sup>:

考虑几何去相干与热噪声去相干。其中, 几何去相干与热噪声去相干的相干系数计算公式分别为<sup>[20]</sup>:

$$\gamma_{\text{geom}} = 1 - \frac{B_{\perp}}{B_{\perp c}} \quad (14)$$

$$\gamma_{\text{thermal}} = \frac{1}{1 + \rho^{-1}} = \frac{1}{\sqrt{(1 + \rho_1^{-1})(1 + \rho_2^{-1})}} \quad (15)$$

式中,  $\rho$  表示系统的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR), 当各天线的信噪比不相同时采用不同下标分开表达;  $B_{\perp c}$  为系统的临界垂直基线长度, 其计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$B_{\perp c} = \frac{\lambda r_0 \Delta f \tan(\theta - \Omega)}{c} \quad (16)$$

式中,  $\Delta f$  是系统的信号带宽;  $\Omega$  是地形的坡度;  $c$  是光速。

### 2.4 叠掩区干涉相位叠加模型

在叠掩区中, 将斜距处于同一个分辨单元内的目标点的带噪声干涉相位以相干系数为权进行加权叠加, 获得同一斜距分辨单元上的顾及叠掩的带噪声干涉相位, 计算公式为:

$$\phi_i(r, z) = \angle \left( \sum_{m=1}^M \gamma_i(k_m) \cdot e^{j\varphi_i(k_m)} \right) \quad (17)$$

式中,  $\phi_i(r, z)$  为第  $i$  个干涉通道在斜距为  $r$ 、方位向距离为  $z$  的斜距分辨单元上的顾及叠掩的带噪声干涉相位;  $\gamma_i(k_m)$  表示某个分辨单元中第  $k_m$  个目标点在第  $i$  个干涉通道中对应的相干系数;  $\varphi_i(k_m)$  表示某个重叠分辨单元中第  $k_m$  个目标点在第  $i$  个干涉通道中对应的带噪声干涉相位;  $e$  表示自然对数的底;  $j$  表示虚数单位;  $M$  表示某个分辨单元的重叠目标点的数量。

## 2.5 多通道 InSAR 干涉相位仿真流程

图 3 为多通道 InSAR 系统干涉相位的仿真方法流程图。首先通过预先建立真实或仿真的地形 DEM, 输入多通道 InSAR 的系统参数、雷达下视角、基线角和距离向波束宽度等相关信息, 然后依据 DEM 和系统参数就可以通过式(8)或式(9)产生每个干涉通道的真实干涉相位; 接着根据每个像素的干涉相位概率密度函数生成相位噪声, 加入到真实干涉相位中; 再利用§2 介绍的几何关系判别法进行叠掩区及阴影区检测(即式(1)和式(3)), 并将叠掩区中同一个分辨单元内的像素的干涉相位以相干系数为权进行加权叠加, 将阴影区像素对应的干涉相位直接替换为高斯白噪声; 最后重新按斜距大小排列各干涉相位, 从而获得顾及叠掩与阴影的多通道 InSAR 干涉相位图。

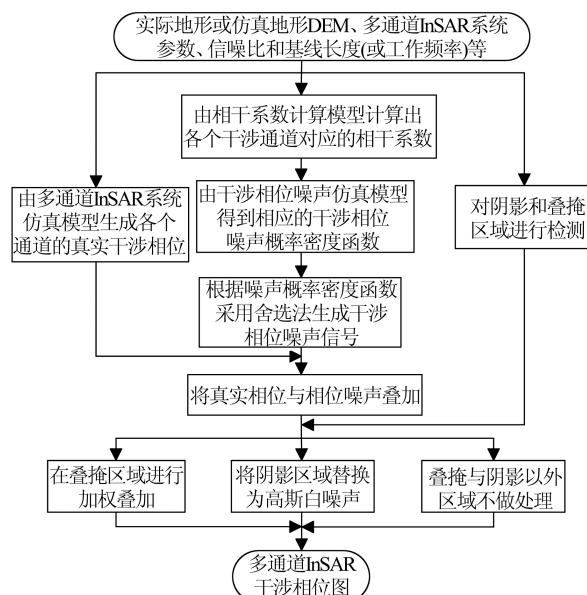


图 3 多通道 InSAR 干涉相位仿真流程图

Fig.3 Flowchart of Multi-channel InSAR Interferogram Simulation

## 3 仿真与分析

为验证本文所设计的顾及叠掩和阴影的多通道 InSAR 干涉图仿真方案的有效性, 分别对 3 个不同场景 DEM 对应的干涉相位进行了仿真(实验环境: CPU Intel i7-8550U, 内存 16 GB, 工具 Matlab), 实验所用的多通道 InSAR 系统参数如表 1 所示。3 个通道对应的相干系数分别设为 0.76、0.79 和 0.81。另外, 不管是仿真地形还是实际地形, 由于其对应的 DEM 及多通道 InSAR 系统参数均为已知值, 因此本文采用几何关系判别

法来确定叠掩区及阴影区的准确位置。

表 1 多通道 InSAR 系统参数

Tab. 1 Multi-baseline InSAR System Parameters

参数名称	参数值
景中心斜距 $R_0/\text{km}$	850
平台高度 $H/\text{km}$	736
下视角 $\theta/(\text{°})$	30
基线角 $\alpha/(\text{°})$	5
信号波长 $\lambda/\text{cm}$	3.1
信号带宽 $\Delta f/\text{MHz}$	100
最短地距 $r_{\min}/\text{m}$	424 828.7
基线 1 长度 $B_1/\text{m}$	562.9
基线 2 长度 $B_2/\text{m}$	375.3
基线 3 长度 $B_3/\text{m}$	225.2
信噪比 $\rho/\text{dB}$	15

实验 1 建立了如图 4 所示的 DEM 仿真场景, 采用(地)距离向  $\times$  方位向坐标等间距网格, 并假设方位向分辨率和(地)距离向分辨率与 DEM 网格间距( $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ )相等。该 DEM 是一个梯形, 大小为  $84 \times 114$  像素, 梯形底部高度为 0 m, 顶部高度为 46.77 m, 斜坡与地面的夹角为  $80.76^\circ$ , 地距向第 38~83 像素部分为叠掩区域, 第 106~114 像素部分为阴影区域。若直接仿真(地)距离向  $\times$  方位向坐标系下的干涉图, 由于此时斜距相同的像素还没有重叠在一起, 阴影区域也没有进行检测, 故无论是用本文方法还是用文献[15]介绍的方法进行仿真, 在得到的干涉图上均看不到叠掩与阴影的影响, 两种方法的仿真结果没有任何区别, 如图 5 所示(如无特殊说明, 本文均假设缠绕相位阈值限于  $(-\pi, \pi]$  之间, 文献[15]方法均写作原始方法)。图 5 为未加入相位噪声时的仿真结果。从图 5 的仿真结果可以看出, 基线较长时干涉相位条纹密集, 基线较短时干涉相位条纹稀疏, 体现了基线长度对干涉相位条纹疏密程度(即频率高低)的影响。

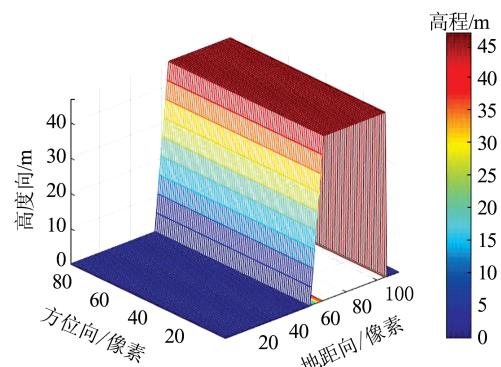


图 4 实验 1 所用仿真地形(地距向  $\times$  方位向)

Fig. 4 Simulated Terrain of Experiment 1

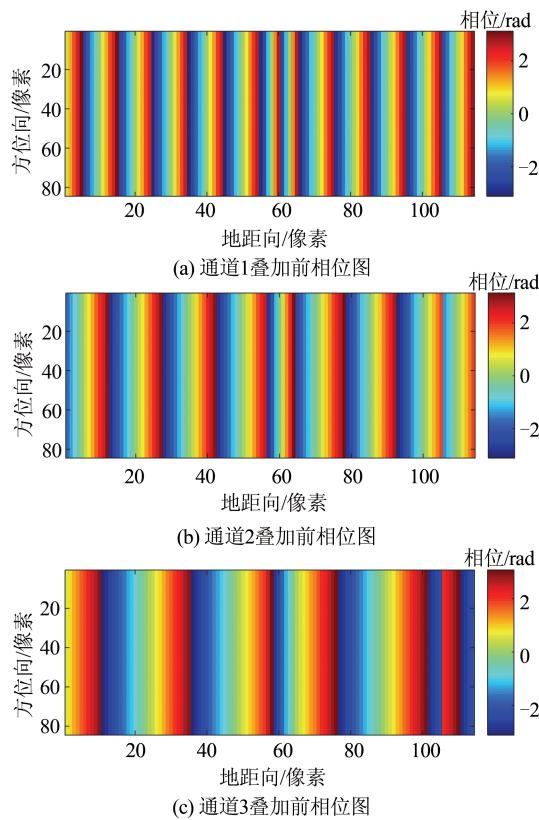


图5 不同通道地距向×方位向仿真干涉图

Fig. 5 Simulated Interferograms of Ground-to-Azimuth Directions for Different Channels

若将图4所示的DEM转换到斜距向×方位

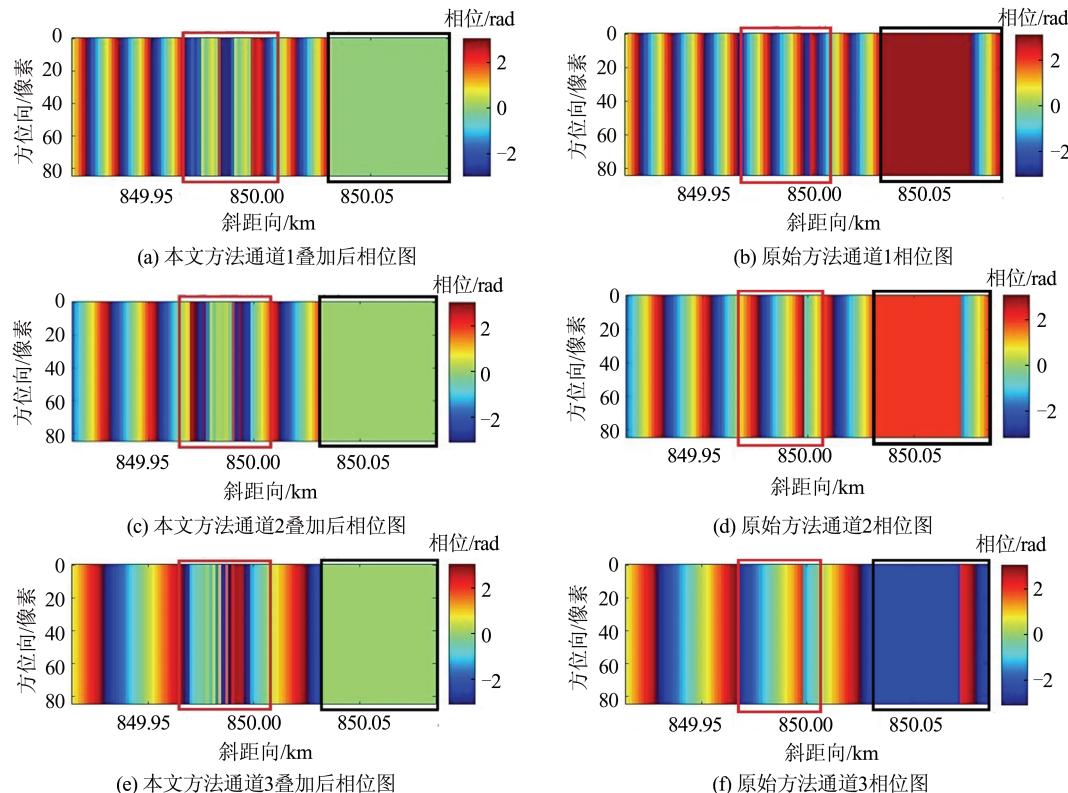


图6 不同通道斜距向×方位向仿真干涉图

Fig. 6 Simulated Interferograms of Slant-Azimuth Directions for Different Channels

向坐标系下，则可利用§2介绍的几何关系判别法检测出叠掩区和阴影区，并按§3介绍的多通道InSAR干涉图仿真模型得到各通道对应的干涉图。此时得到的无噪声多通道InSAR干涉相位仿真结果如图6(a)、6(c)、6(e)所示。其中，红框处为叠掩区，对应斜距向849.97~850.00 km处，黑框处为阴影区，对应斜距向850.03~850.09 km处。在叠掩区内，由于反射信号发生混叠，从图6中可以看出在此区域内干涉相位条纹明显变得更加密集复杂，不再按 $(-\pi, \pi]$ 的规律变化；而在阴影区内，由于无法接收到反射回来的雷达回波信号，无任何有效相位，故假设为零相位。图6(b)、6(d)、6(f)为采用原始方法得到的斜距向×方位向坐标系下的仿真结果。由于未考虑到叠掩与阴影的影响，故在849.97~850.00 km的叠掩区发生了相位丢失（只保留了其中一个像素的干涉相位），而在850.07~850.09 km的阴影区则依然生成了相应的仿真干涉相位。

显然，本文方法的仿真结果比原始方法仿真结果更接近真实情况。如果将生成的相位噪声加入到真实干涉相位中，并在叠掩区进行加权叠加，在阴影区加入高斯白噪声，则可得到加入噪声后的多通道InSAR干涉相位图（见图7）。

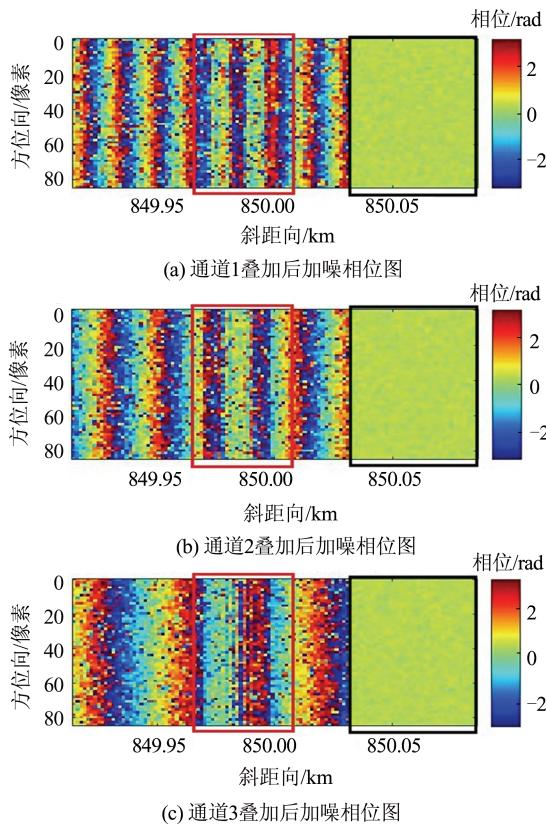


图 7 不同通道斜距向×方位向加噪声后仿真干涉图  
Fig. 7 Simulated Interferograms of Different Channels with Noise in Slant-Azimuth Directions

实验 2 所用 DEM 为更接近真实地形的仿真数据,是根据美国 Isolation Peak (Colorado) 国家公园的真实数字高程模型图<sup>[21]</sup>得到的,其在地距向×方位向对应的像素个数为  $157 \times 458$ ,网格间距设为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ,转换到斜距向×方位向后则变为  $159 \times 458$  像素。图 8(a)为该 DEM 数据的 2D 示意图,图 8(b)为对应的 3D 示意图。根据几何关系判别法可得到如图 8(c)所示的叠掩区及阴影区识别结果,其中正常区域像素标记为数值 0,阴影区像素标记为数值 1,叠掩区像素标记为数值 2。从图 8(c)中可以清楚地看出叠掩主要发生在迎坡面的陡峭地区,而阴影则主要发生在背坡面的陡峭地区。图 8(d)、8(e)和 8(f)为利用原始方法仿真的 3 个不同通道对应的去除平地效应后的无噪声干涉图,图 8(g)、8(h)和 8(i)则为利用本文方法仿真的 3 个不同通道对应的去除平地效应后的无噪声干涉图,仔细对照两者在叠掩区及阴影区对应的干涉相位就会发现两种方法仿真得到的结果确实不一样,而本文方法由于顾及了叠掩及阴影的影响,因而更符合实际情况一些。图 8(j)、8(k)和 8(l)为利用本文方法仿真的 3 个不同通道对应的包含噪声的干涉图,此时可以

观察到在阴影区主要表现为随机噪声。

实验 3 所用 DEM 为根据美国航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)获取的中国新疆吐鲁番盆地某地区的真 DEM 数据(数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台),其在地距向×方位向对应的像素个数为  $500 \times 750$ ,网格间距设为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ,转换到斜距向×方位向后则变为  $520 \times 750$  像素。图 9(a)为 DEM 数据的 2D 示意图,图 9(b)为对应的 3D 示意图。根据几何关系判别法可得到如图 9(c)所示的叠掩区及阴影区识别结果,其中正常区域像素标记为数值 0,阴影区像素标记为数值 1,叠掩区像素标记为数值 2。从图 9 中可以观察到,左下角位置和右侧边界各有一个比较明显的阴影像素集中区域,同时在左半平面也分布了大量的叠掩区和阴影区像素。图 9(d)、9(e)和 9(f)分别为利用本文方法仿真的 3 个不同通道对应的去除平地效应后的无噪声干涉图。图 9(g)、9(h)和 9(i)分别为利用本文方法仿真的 3 个不同通道对应的去除平地效应后包含噪声的干涉图。由该仿真结果可知本文方法较为真实地模拟了顾及叠掩和阴影影响的多通道 InSAR 干涉图。

从上述实验与分析可知,采用本文方法对 DEM 进行多通道 InSAR 干涉图的仿真,真实模拟了叠掩区与阴影区的干涉相位变化,正确反映了地形和基线对干涉相位的影响,为多通道 InSAR 技术的研究和学习提供了参数可控的仿真数据。另外,由于本文所用的叠掩和阴影区域的判别方法为几何关系判别法,是根据已知的 DEM 及多通道 InSAR 系统参数等信息严格按照所有像素与 SAR 主天线之间的几何关系来进行检测的,因而检测结果就是真实结果,此时不需要对检测结果进行定量评价。而如果采用§2 介绍的振幅分割法、局部频率估计法和特征值分解法进行检测而得到的结果则属于估计值,此时可以对比该估计结果与前述真实结果之间的差异,从而得到正确判断为叠掩(或阴影)像素的个数和错误判断为叠掩(或阴影)像素的个数,还可以将它们与叠掩(或阴影)像素总数之间的比值作为定量评价指标。

#### 4 结语

为了对多通道 InSAR 仿真实验的步骤进行简化,给多通道 InSAR 技术的研究提供具有可控

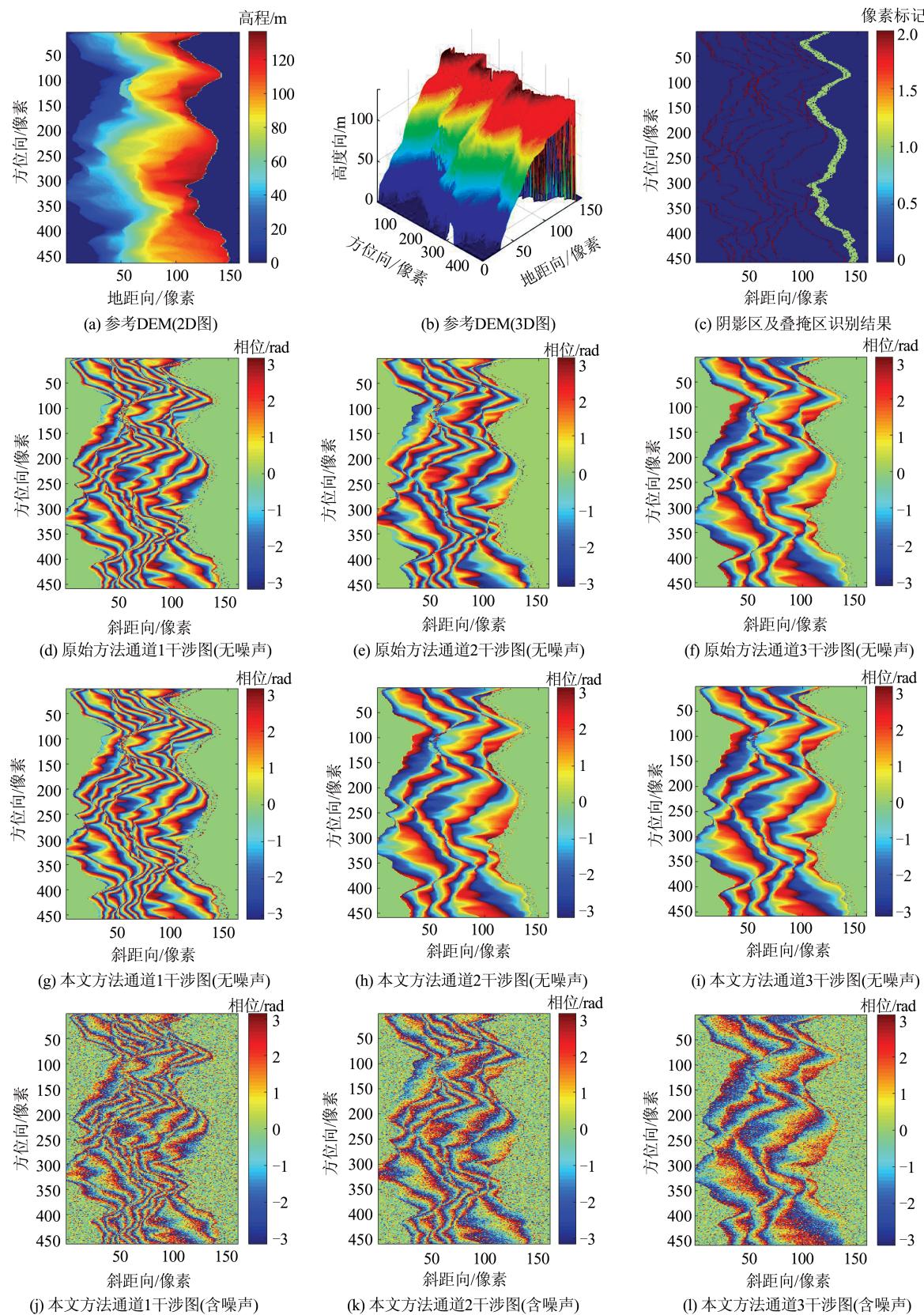


图8 基于美国Isolation Peak(Colorado)高程数据的干涉图仿真结果

Fig. 8 Simulated Interferograms Based on the DEM of Isolation Peak (Colorado), USA

性的仿真途径,本文提出了一种顾及叠掩与阴影等情况的干涉相位级多通道InSAR干涉图仿真方法。该方法首先通过已有的DEM与多通

道InSAR系统的具体参数进行计算,获得各个干涉通道的真实干涉相位;接着根据干涉相位的概率密度函数生成相应的相位噪声,加入到真实干

涉相位中;然后在叠掩区域对斜距相同的像素的干涉相位以相干系数为权进行加权叠加,在阴影区域则直接替换为高斯白噪声;最后重新按斜距大小排列各干涉相位,从而得到顾及叠掩和阴影

的多通道 InSAR 干涉相位图。对仿真结果进行分析,结果显示,此方法简化了实验步骤,易于操作,能够为各种多通道 InSAR 研究的性能比较和定量评估提供合适的仿真数据。

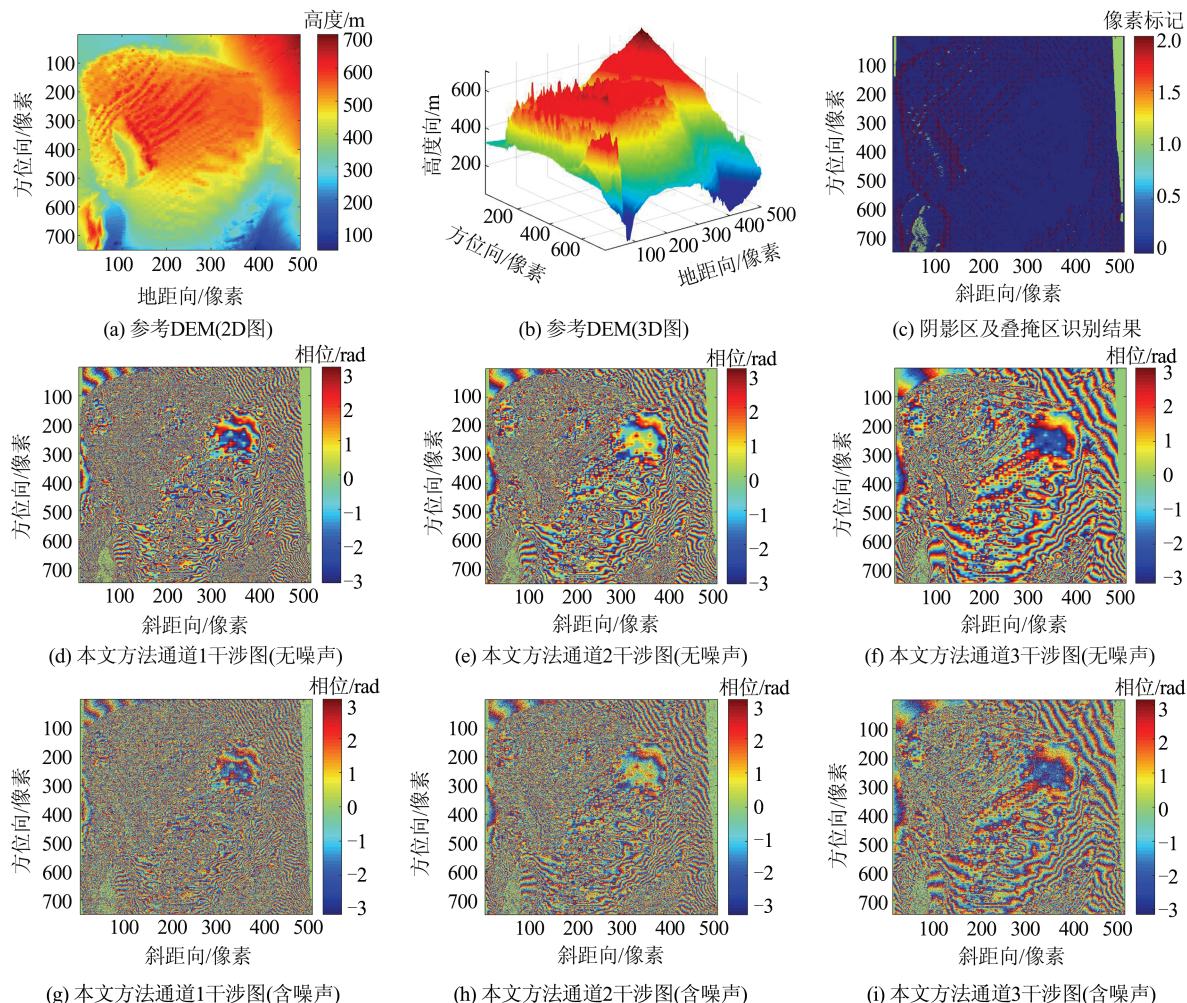


图 9 基于新疆吐鲁番盆地某区域高程数据的干涉图仿真结果

Fig. 9 Simulated Interferograms Based on the DEM of Turpan Basin, Xinjiang

## 参 考 文 献

- [1] Yu Hanwen, Lan Yan, Yuan Zihui, et al. Phase Unwrapping in InSAR: A Review [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2019, 7(1): 40-58
- [2] Li Zhenhong, Song Chuang, Yu Chen, et al. Application of Satellite Radar Remote Sensing to Landslide Detection and Monitoring: Challenges and Solutions [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967-979(李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 967-979)
- [3] Zhang Lei, Wu Jicang, Chen Yanling. An Elevation Model of InSAR and Its Accuracy Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(2): 108-111(张磊, 伍吉仓, 陈艳玲. InSAR 高程模型及其精度分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(2): 108-111)
- [4] Pang Lei, Zhang Jixian, Fan Hongdong. Progress and Tendency of Multibaseline Synthetic Aperture Radar Interferometry Technique [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(9): 2 152-2 157(庞蕾, 张继贤, 范洪冬. 多基线干涉 SAR 测量技术发展与趋势分析 [J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2 152-2 157)
- [5] Ren Yun, Zou Huanxin, Qin Xianxiang, et al. A Method for Layover and Shadow Detecting in InSAR [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(S2): 396-400(任云, 邹焕新, 秦先祥, 等. 一种 InSAR 叠掩与阴影区域的检测方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(S2): 396-400)

- [6] 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(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)
- [7] Wang Jian, Xiang Maosheng, Li Shaoen. A Method for Extracting the SAR Shadow from InSAR Coherence[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(12): 1 063-1 066(王健, 向茂生, 李绍恩. 一种基于InSAR相干系数的SAR阴影提取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(12): 1 063-1 066)
- [8] Chen Wei, Xu Huaping, Li Shuang. A Novel Layover and Shadow Detection Method for InSAR[C]. IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, Beijing, China, 2013
- [9] Eineder M. Efficient Simulation of SAR Interferograms of Large Areas and of Rugged Terrain [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1 415-1 427
- [10] Lombardini F. Absolute Phase Retrieval in a Three-Element Synthetic Aperture Interferometer [C]. International Radar Conference, Beijing, China, 1996
- [11] Yu H, Li Z, Bao Z. A Cluster-Analysis-Based Efficient Multibaseline Phase-Unwrapping Algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 478-487
- [12] Zhang Hongmin, Jin Guowang, Xu Qing, et al. Design and Analysis of Interferograms Simulation Methods for Multi-Baseline InSAR [J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(7): 1 516-1 522(张红敏, 靳国旺, 徐青, 等. 多基线InSAR干涉图仿真方案设计与分析[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(7): 1 516-1 522)
- [13] Wang Qingsong, Huang Haifeng, Dong Zhen, et al. Fast Simulation of InSAR Ideal Interferometric Phase and Precision Analysis [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(18): 5 951-5 954(王青松, 黄海风, 董臻, 等. INSAR理想干涉相位计算的快速方法及精度分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18): 5 951-5 954)
- [14] Ge Shiqi, Liu Guangyan. Fast Simulation Method of Ideal Phase Map for Spaceborne Multi-baseline InSAR [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2014, 36(3): 571-576(葛仕奇, 刘光炎. 星载多基线InSAR理想相位图的快速仿真方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 571-576)
- [15] Yuan Zhihui, Chen Lifu, Fan Shaosheng, et al. An Interferogram Simulation Method for Multi-channel InSAR [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 32(4): 542-548(袁志辉, 陈立福, 樊绍胜, 等. 一种多通道InSAR干涉图的仿真方法[J]. 中国科学院大学学报, 2015, 32(4): 542-548)
- [16] Yuan Zhihui, Lu Zhong, Chen Lifu, et al. A Closed-Form Robust Cluster-Analysis-Based Multi-baseline InSAR Phase Unwrapping and Filtering Algorithm with Optimal Baseline Combination Analysis [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(6): 4 251-4 262
- [17] Yuan Zhihui, Deng Yunkai, Li Fei, et al. Multi-channel InSAR DEM Reconstruction Through Improved Closed-Form Robust Chinese Remainder Theorem [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(6): 1 314-1 318
- [18] Eineder M. Problems and Solutions for InSAR Digital Elevation Model Generation of Mountainous Terrain [C]. The FRINGE 2003 Workshop (ESA SP-550), Frascati, Italy, 2003
- [19] Tough R, Blacknell D, Quegan S. A Statistical Description of Polarimetric and Interferometric Synthetic Aperture Radar Data [J]. *Proceedings of the Royal Society: Mathematical and Physical Sciences*, 1995, 449: 567-589
- [20] Bamler R, Hartl P. Synthetic Aperture Radar Interferometry [J]. *Inverse Problems*, 1998, 14(4): 1-54
- [21] Ghiglia D, Pritt M. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software [M]. New York: Wiley-Interscience, 1998

## Multi-channel InSAR Interferograms Simulation Method Considering Layover and Shadow

YUAN Zhihui<sup>1</sup> GU Yice<sup>1</sup> XING Xuemin<sup>2</sup> CHEN Lifu<sup>1</sup> YU Xiaoying<sup>3</sup>

1 School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

2 School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

3 School of Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

**Abstract:** **Objectives:** In order to simulate the phenomenon of layover and shadow in synthetic aperture radar (SAR) images better in the simulated interferogram, and to provide a suitable data source for the design of multi-channel interferometric synthetic aperture radar (InSAR) system and the research of related algorithms, a simulation method of multi-channel InSAR interferogram considering layover and shadow is proposed. **Methods:** Firstly, according to the basic principle of InSAR, the real interferometric phase of each pixel for each interferometric channel is calculated using the DEM and the designed multi-channel InSAR system parameters. Secondly, the corresponding phase noise is generated and added to the real interferometric phase according to the probability density function of the interferometric phase noise. Thirdly, the layover areas and shadow areas are detected according to the exact geometric relationship between the multi-channel InSAR system and the DEM. Fourthly, the initial interferometric phases of the layover areas overlapped in the same resolution unit are weighted superimposed, the initial interferometric phases of the shadow areas obtained in the third step is replaced by Gaussian white noise, and the initial interferometric phases of the other areas are not processed. Therefore, the simulated multi-channel InSAR interferograms that takes into account layover and shadow are obtained. **Results:** Three simulation experiments are carried out with three different groups of DEM. From the simulated interferograms using the proposed method in the three experiments, it can be seen that the interferometric phase in the layover areas is noise or even ambiguous with reverse fringe frequency, and the interferometric phase in the shadow areas is random noise, which are very consistent with the characteristics of the real interferograms. However, the characteristics of the layover area and shadow area cannot be seen in the interferograms simulated by the original method without considering layover and shadow. Thus the effectiveness of the proposed multi-channel InSAR interferograms simulation method is verified. **Conclusions:** The simulation results and related analysis show that the multi-channel InSAR interferograms simulation method is simple and fast, and takes into account the influence of layover and shadow on the interferometric phase, so it can provide more realistic simulation data for the research of multi-channel InSAR techniques and related algorithms.

**Key words:** interferometric synthetic aperture radar(InSAR); multi-channel(multi-baseline/multi-frequency); interferogram simulation; layover; shadow

**First author:** YUAN Zhihui, PhD, specializes in signal processing and the application of synthetic aperture radar interferometry, phase unwrapping, high-resolution digital elevation model generation, and algorithm design. E-mail: yuanzhihui@csust.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China( 61701047, 41701536 ); the Natural Science Foundation of Hunan Province( 2019JJ50639, 2017JJ3322 ); the Foundation of Education Bureau of Hunan Province( 18A148 ).

**引文格式:** YUAN Zhihui, GU Yice, XING Xuemin, et al. Multi-channel InSAR Interferograms Simulation Method Considering Layover and Shadow[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11):1717-1727. DOI:10.13203/j.whugis20190222(袁志辉,谷翼策,邢学敏,等.顾及叠掩与阴影的多通道 InSAR 干涉图仿真方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(11):1717-1727. DOI:10.13203/j.whugis20190222)