

文章编号:2095-6134(2015)04-0542-07

一种多通道 InSAR 干涉图的仿真方法*

袁志辉^{1†}, 陈立福¹, 樊绍胜¹, 郜参观²

(1 长沙理工大学 电力与交通安全监控及节能技术教育部工程研究中心, 长沙 410004; 2 伊犁师范学院
电子与信息工程学院, 新疆 伊宁 835000)
(2014 年 7 月 30 日收稿; 2015 年 3 月 3 日收修改稿)

Yuan Z H, Chen L F, Fan S S, et al. An interferogram simulation method for multi-channel InSAR[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015,32(4):542-548.

摘要 为了简化多通道 InSAR 数据仿真的步骤,给多通道 InSAR 技术的研究提供参数可控的仿真数据,提出一种多通道 InSAR 干涉图的仿真方法.方法由已知的数字高程模型(DEM)和系统参数计算得到每个干涉通道的真实干涉相位,并根据各种噪声引起的去相关计算相应的相干系数,然后利用舍选法生成相应的相位噪声加入到真实干涉相位中,这样便得到所需的多通道 InSAR 干涉图.分析和仿真结果表明,该方法简便易行,且严格考虑了干涉相位噪声的概率密度函数,为各种多通道 InSAR 技术的性能对比和定量分析提供合适的仿真数据.

关键词 干涉合成孔径雷达;多通道;干涉图仿真;舍选法

中图分类号:TP957.52 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2015.04.017

An interferogram simulation method for multi-channel InSAR

YUAN Zhihui¹, CHEN Lifu¹, FAN Shaosheng¹, GAO Canguan²

(1 Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China; 2 School of Electronic and Information Engineering, Yili Normal University, Yining 835000, Xinjiang, China)

Abstract In order to simplify the procedure of multi-channel InSAR interferogram simulation and to provide simulated data with adjustable parameters for studies of multi-channel InSAR technology, we propose a multi-channel InSAR interferogram simulation method. The method uses the available DEM and system parameters to calculate the real interferometric phase for each channel, and calculates the coherence caused by various kinds of noise. Then the method utilizes acceptance-rejection method to generate the corresponding phase noise, and adds it to the real interferometric phase. So the needed multi-channel InSAR interferograms are obtained. Analysis and simulation results indicate that the approach is simple and convenient. The approach considers the interferometric phase noise's probability density function strictly, and it provides suitable simulation data sets for the performance comparison and quantitative analysis of various kinds of multi-channel InSAR technique.

* 国家自然科学基金(41201468)资助

† 通信作者, E-mail: yuazh.2003@163.com

Key words interferometric synthetic aperture radar (InSAR); multi-channel; interferogram simulation; acceptance-rejection method

多通道(多基线/多频率) InSAR 测量技术^[1]是在传统单基线 InSAR 测量技术基础上发展起来的一种新型合成孔径雷达地面测绘技术,它可以克服或减少复杂地形及较大噪声干扰的影响,提高 InSAR 对复杂地形的测量精度,有效解决叠掩问题,近年来已成为 InSAR 领域的一个研究热点和重要发展方向^[2]. 然而,目前国内外所能提供的实测多通道 InSAR 数据十分有限,不能完全满足人们对该技术进行理论研究的实际需求,因此,对 InSAR 数据的仿真成为弥补这一不足的主要途径. 而且,由于其参数的可控性和结果的可预知性,InSAR 数据仿真对各种算法的定量分析和性能对比起到了非常大的帮助作用,因而受到人们越来越多的重视.

根据目前国内外发表的文献,可以将 InSAR 数据的仿真分为 3 个层次:原始信号级^[3-7]、单视复图像级^[8-9]和干涉相位级^[10]. 其中,原始信号级数据仿真根据地面后向散射系数模型、系统参数及成像几何关系仿真生成雷达回波,压缩成像后经干涉处理便得到仿真的干涉条纹图. 这种级别的仿真完全按照实际回波生成的过程进行模拟,可以方便地加载各种影响因素(包括所有雷达系统建模中所有的模型参数),因而得到的结果最接近实际情况,但是仿真过程比较耗时,难以处理大规模的数据. 单视复图像级数据仿真则略过回波模拟这一步,直接生成聚焦之后的 InSAR 图像对,再经干涉处理得到相应的条纹图. 该层次的仿真由于回避了原始信号积累和成像处理过程中的误差,比较适用于干涉处理中对图像配准和相位解缠等步骤的分析. 干涉相位级数据仿真则直接根据干涉几何关系得到的相位差信息构建干涉条纹图,将各种类型的误差因素以加性噪声的形式加入到干涉条纹图中,可以很方便地控制干涉相位噪声的大小,因而仿真效率较高,比较适用于大规模数据的仿真和对算法性能的定量分析. 多通道干涉由于需要同时处理两幅以上的 SAR 图像,数据量相对较大,且其对应的数据仿真主要是为了分析和验证某些算法的性能,因而比较适合采用单视复图像级或干涉相位级的仿真.

传统的 InSAR 数据仿真大多是针对单基线

情况的,而关于多通道 InSAR 数据仿真的文献还比较少. 其中,文献[11]提出一种三天线情况下利用 Cholesky 分解生成复数干涉图的方法,该方法已经应用到多基线相位解缠算法的仿真验证中^[12-13];文献[14]借助摄影测量的方法设计多基线 InSAR 干涉图的直接法和间接法仿真方案,但该方法需要计算每个点的像点坐标和地面点坐标,计算较为复杂,且没有严格考虑干涉相位噪声的概率密度分布函数. 其他文献也有用到多通道 InSAR 仿真数据的,但都没有介绍具体仿真过程.

为了简化多通道 InSAR 数据仿真的步骤,为多通道 InSAR 技术的研究提供参数可控的仿真数据,本文提出一种多通道 InSAR 干涉图的仿真方法. 该方法由已知的数字高程模型(digital elevation model, DEM)得到每个干涉通道的真实干涉相位,接着根据实际需要计算各种噪声引起的去相关,然后根据相关系数和干涉相位噪声的概率密度函数加入相应的相位噪声,便得到所需的多通道 InSAR 干涉图. 分析和仿真结果表明,该方法简便易行,且严格考虑了干涉相位噪声的分布函数,可以为各种多通道 InSAR 技术的性能对比和定量分析提供合适的仿真数据.

1 多通道 InSAR 干涉图的仿真模型

1.1 多通道 InSAR 系统仿真模型

下面以多基线 InSAR 系统为例介绍多通道 InSAR 系统的仿真模型,其几何示意图如图 1 所示.

图中, A_0, A_1, \dots, A_N 为垂直于航迹方向的天线相位中心, H 表示主天线相位中心 A_0 的航高, θ 为主天线的侧视角, α 为水平基线角, r_0, r_1, \dots, r_N 分别为地面某点 P 到 A_0, A_1, \dots, A_N 的斜距, y_P 为地距, h 为 P 点的高程, A_1, \dots, A_N 分别与 A_0 形成稳定的干涉基线 B_1, \dots, B_N , 其对应的垂直基线分别为 $B_{\perp 1}, \dots, B_{\perp N}$. 假设系统工作在乒乓模式,则由 InSAR 的基本原理可知第 i 副天线与主天线形成的干涉相位为

$$\varphi_i = \frac{4\pi}{\lambda}(r_0 - r_i) = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r_i, \quad (1)$$

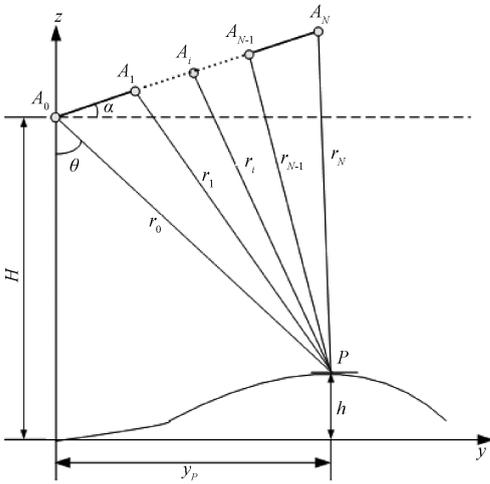


图 1 多基线 InSAR 系统几何示意图

Fig. 1 Multi-baseline InSAR system geometry

式中, φ_i 为第 i 个干涉通道的干涉相位, λ 为系统的工作波长, r_i 为第 i 副天线到目标点 P 的斜距, Δr_i 为点 P 到两天线之间的斜距之差。

又由上图的几何关系可知

$$r_i^2 = r_0^2 + B_i^2 - 2r_0B_i\sin(\theta - \alpha), \quad (2)$$

$$h = H - r_0\cos\theta. \quad (3)$$

联合式(1)一式(3)并化简近似便可得到干涉相位与地形高程之间的关系为

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

因此,只要知道真实地形的 DEM 和系统几何参数即可仿真出各个通道对应的真实干涉相位 φ_i 。

此外,目前大部分文献[12-13, 15]均直接仿真生成去平地效应以后的真实干涉相位,为

$$\bar{\varphi}_i = \frac{2\pi}{h_{a_i}} h = \frac{4\pi B_{\perp i}}{\lambda r_0 \sin\theta} h, \quad (5)$$

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

$$h_{a_i} = \frac{\lambda r_0 \sin\theta}{2B_{\perp i}}. \quad (6)$$

多频率 InSAR 系统与多基线 InSAR 系统相似,只是将以上公式中的基线保持不变,而波长的个数改为 N 而已。

1.2 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不是只有与真实地形高

度相关的干涉相位,而是存在一定的噪声,并呈现出统计特性,其概率密度函数^[16]可以表示为

$$\begin{aligned} pdf(\varphi_i; \gamma_i, L, \varphi_i) &= \frac{(1 - |\gamma_i|^2)^L}{2\pi} \left\{ \frac{\Gamma(2L-1)}{[\Gamma(L)]^2 2^{2(L-1)}} \times \right. \\ &\left[\frac{(2L-1)\beta_i}{(1-\beta_i^2)^{L+0.5}} \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin\beta_i \right) + \frac{1}{(1-\beta_i^2)^L} \right] + \\ &\frac{1}{(2L-1)} \sum_{r=0}^{L-2} \frac{\Gamma(L-0.5-r)}{\Gamma(L-0.5-r)} \frac{\Gamma(L-1-r)}{\Gamma(L-1)} \\ &\left. \frac{1 + (2r+1)\beta_i^2}{(1-\beta_i^2)^{r+2}} \right\}, \quad (7) \end{aligned}$$

式中, φ_i 为带噪声的干涉相位, γ_i 为相干系数, L 为多视视数, $\Gamma(\cdot)$ 为 gamma 函数, $\beta_i = |\gamma_i| \cos(\varphi_i - \varphi_i)$ 。在单视情况下,其表达式^[17]可以简化为

$$\begin{aligned} pdf(\varphi_i; \gamma_i, \varphi_i) &= \frac{1 - |\gamma_i|^2}{2\pi} \frac{1}{1 - |\gamma_i|^2 \cos^2(\varphi_i - \varphi_i)} \times \\ &\left[1 + \frac{|\gamma_i| \cos(\varphi_i - \varphi_i) \arccos(-|\gamma_i| \cos(\varphi_i - \varphi_i))}{\sqrt{1 - |\gamma_i|^2 \cos^2(\varphi_i - \varphi_i)}} \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

令干涉相位噪声为 $n_i = \varphi_i - \varphi_i$, 则式(7)和式(8)便转换成了相位噪声的概率密度函数: $pdf(n_i; \gamma_i, L)$, 从而可以根据此概率密度函数生成相应的噪声。

1.3 相干系数计算模型

相干系数是 SAR 干涉测量中非常重要的一个参数,它是局部干涉条纹质量的重要评价标准,代表测量干涉相位与真实干涉相位的接近程度。要得到干涉相位噪声的精确概率密度分布函数表达式,首先需要对相干系数进行计算。影响 SAR 图像相干性的因素有很多,主要的去相干源可以分为以下 6 大类^[18]: 1) 基线或几何去相干 (γ_{geom}); 2) 多普勒质心去相干 (γ_{DC}); 3) 体散射去相干 (γ_{vol}); 4) 热噪声去相干 (γ_{thermal}); 5) 时间去相干 (γ_{temporal}); 6) 数据处理去相干 ($\gamma_{\text{processing}}$)。每种去相干源都由不同的原因造成,它们的乘积便是总的相干系数^[18]的计算公式

$$\gamma_{\text{tot}} = \gamma_{\text{geom}} \times \gamma_{\text{DC}} \times \gamma_{\text{vol}} \times \gamma_{\text{thermal}} \times \gamma_{\text{temporal}} \times \gamma_{\text{processing}}. \quad (9)$$

在实际的干涉图仿真过程中,可以根据需要加入不同的去相干源。对于多通道 InSAR 测量技术的研究来说,目前主要还是集中在对算法性能的分析上,因此一般只考虑热噪声去相干和几何去相干。其中,热噪声去相干的相干系数^[18]计算

公式为

$$\gamma_{\text{thermal}} = \frac{1}{1 - \text{SNR}^{-1}} \text{ 或 } \\ = \frac{1}{\sqrt{(1 - \text{SNR}_1^{-1})(1 - \text{SNR}_2^{-1})}}, \quad (10)$$

式中 SNR 为系统的信噪比,当各个天线的信噪比不同时则用下标分别表示.几何去相干的相干系数^[18]计算公式为

$$\gamma_{\text{geom}} = 1 - \frac{B_{\perp}}{B_{\perp c}}, \quad (11)$$

式中, $B_{\perp c}$ 为系统的临界垂直基线长度^[18]

$$B_{\perp c} = \frac{\lambda r_0 \Delta f \tan(\theta - \Omega)}{c}, \quad (12)$$

式中, Δf 为系统的信号带宽, Ω 为地形坡度, c 为光速,其他参数在前面已经解释过,此处不再赘述.

2 多通道 InSAR 干涉图的仿真方法

多通道 InSAR 干涉图的仿真流程如图 2 所示.首先输入真实地形或仿真地形的 DEM、多通道 InSAR 系统的系统参数、信噪比和各基线的长度(或各干涉通道的工作频率)等信息,根据 DEM 和系统参数即可由多通道 InSAR 系统的干涉相位仿真模型即式(4)或式(5)生成各个干涉通道的真实干涉相位,接着根据系统参数、信噪比和基线长度(或工作频率)由相干系数计算模型即式(10)计算各干涉通道对应的相干系数.再根据相干系数、式(7)和式(8)计算得到各干涉通道对应相位噪声的概率密度函数 $pdf(n_i; \gamma_i, L)$. 然后根据得到的干涉相位噪声概率密度函数 $pdf(n_i; \gamma_i, L)$ 采用舍选法生成干涉相位噪声信号.最后将各个干涉通道的真实干涉相位和对应的相位噪声信号相加便得到仿真的多通道 InSAR 干涉图.其中,DEM 可以采用斜距 \times 方位向坐标的等距网格,也可以采用地距 \times 方位向坐标的等距网格,不过此时还要将每个网格对应的斜距根据系统几何参数计算出来,为了简化流程,本文均采用斜距 \times 方位向坐标等距网格的 DEM.

另外,利用舍选法生成干涉相位噪声的具体步骤如下:假设干涉图的大小为 row 行 \times col 列个像素,令所有像素的相位噪声均初始化为零,从第一个像素开始,逐个像素执行如下操作:

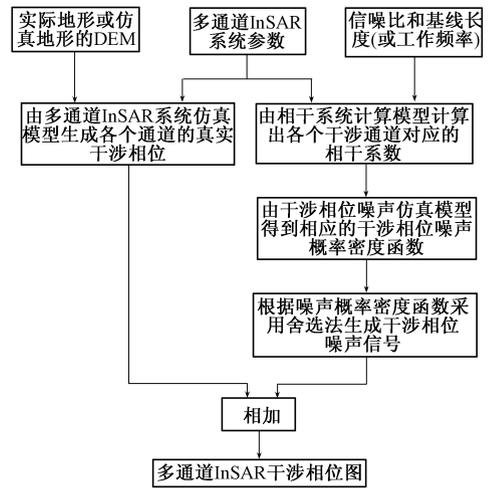


图 2 多通道 InSAR 干涉图仿真流程图

Fig. 2 Flowchart of multi-channel InSAR interferogram simulation

- 1) 令 $th = 1/\max(pdf(n_i; \gamma_i, L))$;
- 2) 在 $(0, th)$ 范围内任意选取一个常数 β , 使 $\beta \times pdf(n_i; \gamma_i, L) < 1$, 其中 $n_i \in (-\pi, \pi)$;
- 3) 产生 2 个符合 $(0, 1)$ 均匀分布的随机数 a_1 和 a_2 , 令 $y = -\pi + 2\pi \cdot a_1$;
- 4) 如果 $a_2 \leq \beta \cdot pdf(y; \gamma_i, L)$, 则令 $n_i = y$, 否则, 剔除 a_1 和 a_2 , 重返步骤 3), 直到满足条件为止.

对每个干涉通道重复执行步骤 1) — 4), 便生成了整个多通道 InSAR 系统的干涉相位噪声图系列.

3 仿真结果

为了验证本文所提方法的有效性,本节利用上节所述方法给出 2 组仿真实验的结果,第 1 组采用仿真地形的 DEM,仿真了含平地效应和去平地效应的干涉图,用以验证方法的有效性;第 2 组采用真实地形的 DEM,以便使仿真结果更接近真实情况.通过仿真结果可以分析基线长度对干涉条纹频率的影响以及干涉条纹的特点.

第 1 组仿真实验所用的参数如表 1 所示.以后如不特别说明,本文中所仿真的干涉相位图均为缠绕以后的相位图,且其相位值均限定在 $(-\pi, \pi)$ 之间.

仿真地形的 DEM 如图 3 所示,该 DEM 模拟了一个高度为 150 m 的椭圆锥,由于已经转换到斜距向 \times 方位向坐标下,所以看起来是向左倾斜的.它的大小为 100×366 像素,网格间距与分辨

率相同, 距离向和方位向的分辨率均设定为 2.5 m.

表 1 多通道 InSAR 系统参数

Table 1 Multi-baseline InSAR system parameters

景中心斜距 R_0 /km	500
平台高度 H /km	433
视角 $\theta/(\circ)$	30
基线角 $\alpha/(\circ)$	5
信号波长 λ /cm	3.1
信号带宽 Δf /MHz	100
基线 1 长度 B_1 /m	168.87
基线 2 长度 B_2 /m	112.58
基线 3 长度 B_3 /m	67.55
信噪比 SNR/dB	15

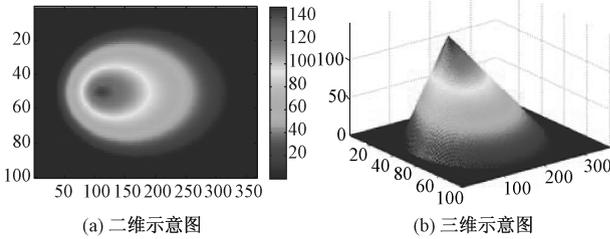


图 3 仿真地形的 DEM

Fig. 3 DEM of simulated terrain

图 4 为通过本文方法仿真得到的含平地效应的多通道 InSAR 干涉图, 其中, 图 4(a)、4(c) 和 4(e) 为根据式(5)仿真得到的真实干涉相位图, 而图 4(b)、4(d) 和 4(f) 则是对应的加入噪声以后的干涉相位图. 图 5 是去掉平地效应以后的多通道 InSAR 干涉图, 其中, 图 5(a)、5(c) 和 5(e) 是根据式(6)仿真得到的真实去平地效应干涉相位图, 图 5(b)、5(d) 和 5(f) 是相应的加入噪声后的去平地效应干涉相位图.

第 2 组仿真实验所用的参数与第 1 组实验基本相同, 不过通道数改成 2 个. 为了增加视觉上的效果, 基线长度分别改成 300 m 和 200 m. 实验所用真实地形的 DEM 如图 6 所示, 它是根据美国 Isolation Peak (Colorado) 国家公园的真实数字高程模型图^[19]得到的, 其大小为 458×157 像素, 最大高度为 137 m. 为简单起见, 本次实验只仿真了去平地效应以后的干涉相位图, 仿真结果如图 7 所示. 其中, 图 7(a)、7(b) 为不带噪声的真实干涉相位图, 图 7(c)、7(d) 为加入噪声以后的干涉相位图.

从这 2 组仿真实验的结果可以观察到: 不管是去掉平地效应还是没有去掉平地效应的干涉条

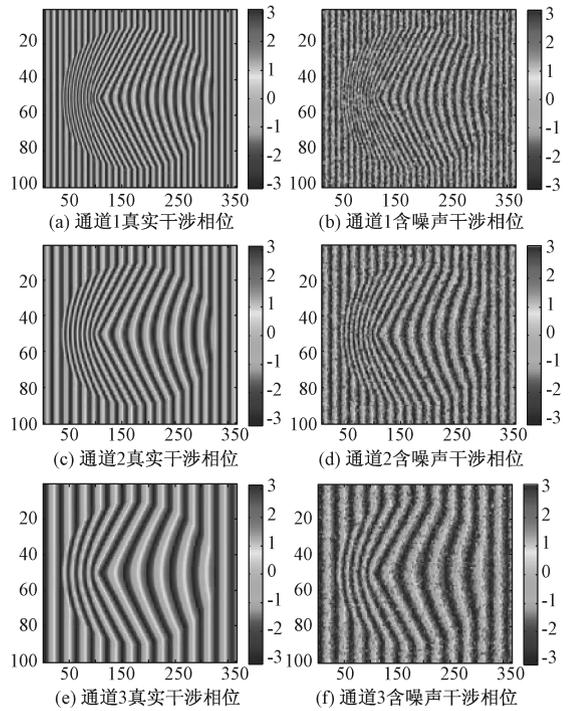


图 4 仿真地形的含平地效应干涉图

Fig. 4 Interferogram of simulated terrain with flat-earth

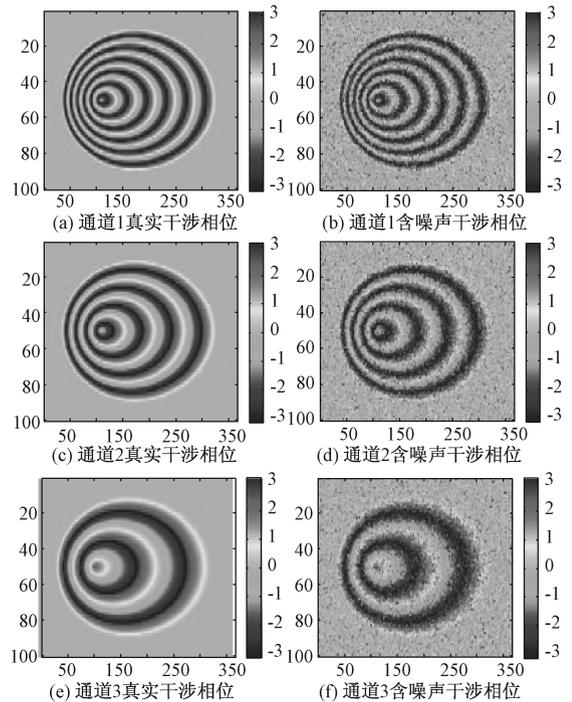


图 5 仿真地形的去平地效应干涉图

Fig. 5 Interferogram of simulated terrain with the removed flat-earth effect

纹都具有近密远疏的特点, 而且条纹的密度与地形实际高度的变化有关. 同时, 对比同一组实验内几个通道的干涉图还可以发现: 基线越长, 干涉条

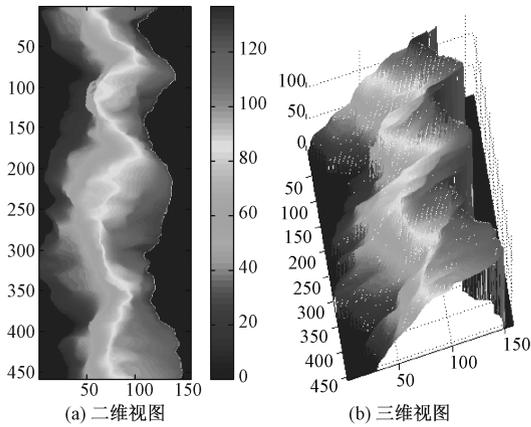


图 6 真实地形的 DEM
Fig. 6 DEM of the true terrain

4 结论

为了简化多通道 InSAR 数据仿真的步骤, 给多通道 InSAR 技术的研究提供参数可控的仿真数据, 本文提出一种多通道 InSAR 干涉图的仿真方法. 该方法由已知的数字高程模型和系统参数得到每个干涉通道的真实干涉相位, 接着根据实际需要计算各种噪声引起的去相关, 然后根据相关系数和干涉相位噪声的概率密度函数利用舍选法加入相应的相位噪声, 便得到所需的多通道 InSAR 干涉图. 分析和仿真结果表明, 该方法简单易行, 且严格考虑了干涉相位噪声的分布函数, 可以为各种多通道 InSAR 技术的性能对比和定量分析提供合适的仿真数据. 下一步将考虑存在叠掩和阴影等影响因素情况下的干涉图仿真方法.

参考文献

[1] Ferraiuolo G, Meglio F, Pascasio V, et al. DEM reconstruction accuracy in multichannel SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1) : 191-201.

[2] 庞蕾, 张继贤, 范洪冬. 多基线干涉 SAR 测量技术发展及趋势分析 [J]. 电子学报, 2010, 38(9) : 2 152-2 157.

[3] He Z, He F, Dong Z, et al. real-time raw-signal simulation algorithm for inSAR hardware-in-the-loop simulation applications [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(1) : 134-138.

[4] Mori A, Vita F D. A time-domain raw signal simulator for interferometric SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9) : 1 811-1 817.

[5] Franceschetti G, Iodice A, Migliaccio M, et al. A novel across-track SAR interferometry simulator [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3) : 950-962.

[6] Franceschetti G, Migliaccio M, D. Riccio, et al. SARAS: A synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(1) : 110-122.

[7] 汪丙南, 陈立福, 向茂生. 基于起伏地形的干涉 SAR 回波数据仿真 [J]. 宇航学报, 2011, 32(9) : 1 986-1 993.

[8] Xu W, Cumming I. Simulator for repeat-pass satellite inSAR studies [C] // IEEE IGARSS 97, Singapore. 1997 : 1 704-1 706.

[9] 李文强, 李景文, 陈杰. 一种干涉 SAR 复图像数据的快速仿真方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(1) : 31-35.

[10] Eineder M. Efficient simulation of SAR interferograms of large

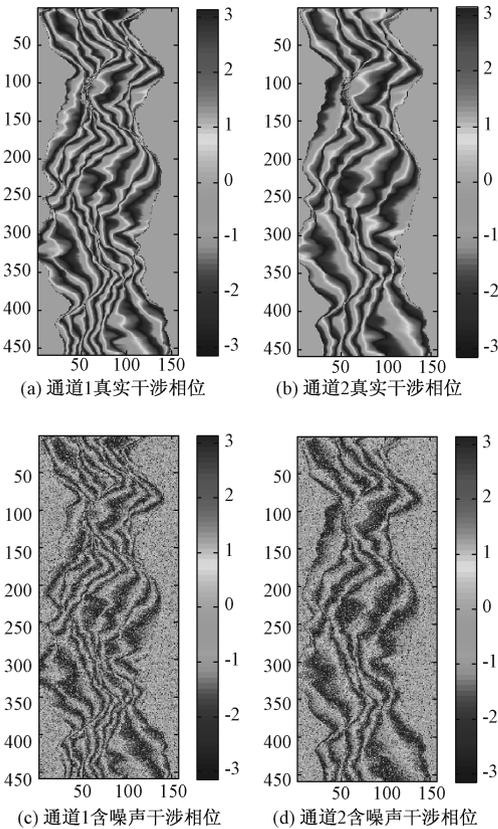


图 7 真实地形的去平地效应干涉图仿真结果
Fig. 7 Interferogram of true terrain with the removed flat-earth effect

纹越密集, 条纹频率越高; 基线越短, 干涉条纹越稀疏, 条纹频率越低. 由此可见, 仿真结果完全符合实际干涉条纹的特点, 从而验证了本文方法的有效性, 可以作为检验多通道 InSAR 测量技术性能的参考数据.

- areas and of rugged terrain [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1415-1427.
- [11] Lombardini F. Absolute phase retrieval in a three-element synthetic aperture interferometer [C] // *Proc CIE Int Conf Radar*, Beijing, China, 1996: 309-312.
- [12] Yu H W, Li Z F, Bao Z A. cluster-analysis-based efficient multibaseline phase-unwrapping algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 478-487.
- [13] Li Z F, Bao Z, Suo Z Y. A joint image coregistration, phase noise suppression, and phase unwrapping method based on subspace projection for multibaseline InSAR systems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(3): 584-591.
- [14] 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): 1516-1522.
- [15] Pascazio V, Schirinzi G. Multifrequency InSAR height reconstruction through maximum likelihood estimation of local planes parameters [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(12): 1478-1489.
- [16] Tough R J A, Blacknell D, Quegan S. A statistical description of polarimetric and interferometric synthetic aperture radar [J]. *Proceedings of the Royal Society London A*, 1995, 449: 567-589.
- [17] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry [J]. *Inverse Problems*, 1998, 14(4): R1-R54.
- [18] Hanssen R F. *Radar interferometry: data interpretation and error analysis* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [19] Ghiglia D C, Pritt M D. *Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software* [M]. New York: Wiley, 1998.