

三基线毫米波 InSAR 的相位解缠及高程反演

潘舟浩^{1,2,3}, 刘波^{1,2,3}, 张清娟^{1,2,3}, 李道京^{1,2}

(1. 微波成像技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要:场景内高程突变超过干涉雷达不模糊高程的一半时,会导致常规相位解缠绕方法失效,在毫米波段该问题尤为突出.研究了基于聚类分析的三基线毫米波 InSAR 相位解缠绕方法,改进了聚类分析中直方图包络波峰选取策略.对场景中高程突变引起的阴影区域相位噪声较大的问题,使用掩膜门限处理,改善了聚类分析结果.计算机仿真结果和机载毫米波三基线 InSAR 实际数据处理结果验证了上述方法的有效性.

关键词:毫米波;干涉合成孔径雷达;相位解缠;数字高程;三基线

中图分类号:TN958 **文献标识码:**A

Millimeter-wave InSAR phase unwrapping and DEM reconstruction based on three-baseline

PAN Zhou-Hao^{1,2,3}, LIU Bo^{1,2,3}, ZHANG Qing-Juan^{1,2,3}, LI Dao-Jing^{1,2}

(1. Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Conventional phase unwrapping methods will fail when the height variation of highly steep terrain exceeds half of the ambiguity height. In the millimeter-wave band, this problem is particularly severe. The three-baseline millimeter-wave InSAR phase unwrapping method based on cluster analysis was studied. In cluster analysis, isolating the peaks on the wave curve of the histogram is improved. The mask on the shadow cast by the steep terrain is proposed in order to improve the cluster analysis. The validity of the proposed method was testified by both simulation and an example of its application.

Key words: millimeter-wave; InSAR; phase unwrapping; DEM; three-baseline

PACS: 84.40.Xb

引言

干涉合成孔径雷达在地形测绘等^[1]领域有着广泛的应用,它是通过对同一个目标场景在不同位置处观测数据的干涉相位差的处理,进行高程反演^[2].干涉处理获得的干涉相位模 2π ,即相位缠绕,需要通过相位解缠绕才能获得真实的干涉相位^[3].因此,相位解缠绕技术在干涉信号处理中具有重要意义.

目前,基于单基线的相位解缠绕技术已获得广

泛的应用^[4].传统的单基线干涉相位解缠绕基于相位连续性假设,即要求任意相邻像素相位差的绝对值小于 π ,因此单基线 InSAR 系统只对地形变化较为缓慢的区域有效.但是,并不是所有的实际场景都服从这个假设.为叙述方便,定义相邻像素间的高度变化超出不模糊高程(缠绕相位图中一个干涉条纹对应的高度变化即为不模糊高程)的一半时,为高程突变.传统的单基线相位解缠绕方法将无法获取该区域的真实相位.在实际测绘中,孤立的树木通常就可看作高程突变区域,传统的处理方法很难得到

收稿日期:2012-10-11,修回日期:2012-12-17

Received date: 2012-10-11, revised date: 2012-12-17

基金项目:国家自然科学基金(61271422)和国家重点基础研究发展计划项目(2009CB72400)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61271422); National Program on Key Basic Research Project of China (2009CB72400)

作者简介(Biography):潘舟浩(1986-),男,浙江舟山人,博士研究生,研究方向为雷达信号处理. E-mail: pzhpzh2008@163.com

其真实的数字高程.为了解决高程突变区域的相位解缠问题,文献^[5]在单基线 InSAR 的基础上提出了多基线 InSAR 技术.

多基线 InSAR 系统在垂直航向上具有多个不同长度的基线,能够获得多幅缠绕相位图,根据中国余数定理,只要不同基线之间互质,通过长短基线的联合,并通过求解同余方程组,可以极大地提高它们的不模糊高程,从而突破相位连续性假设的限制,完成对高程突变区域的相位解缠绕以及高程反演工作^[5].目前,公开报导的多基线毫米波 InSAR 系统主要有,德国的 MENPHIS 系统^[6,7]和我国由中科院电子所研制的第一部毫米波三基线 InSAR 原理样机系统等^[8-10].

本文研究了基于聚类分析^[11]的三基线相位解缠绕方法,解决了场景中高度较高的树木相位缠绕的问题.

1 三基线相位解缠绕基本原理

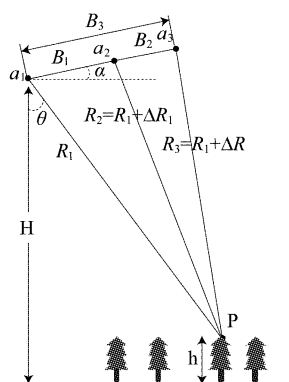


图1 三基线 InSAR 系统成像几何模型
Fig. 1 Geometric model of three-baseline InSAR imaging system

1.1 三基线 InSAR 成像几何模型

三基线 InSAR 系统成像几何模型如图 1 所示,载机飞行方向垂直于纸面向里,其中, a_1 、 a_2 、 a_3 表示垂直于航向的 3 个天线,它们构成了 B_1 、 B_2 、 B_3 共 3 条基线, P 表示场景中的点目标, θ 为天线下视角, H 表示载机高度, α 表示基线倾角(即为基线与水平方向的夹角), R_1 表示天线 1 到目标点的距离, h 表示目标高度.

下面仅以 a_1 和 a_2 两个天线简单介绍干涉成像原理.由图 1 所示的几何模型^[11],有

$$\begin{aligned} R_2^2 &= (R_1 + \Delta R_2)^2 \\ &= R_1^2 + B_1^2 - 2R_1B_1\cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \theta\right), \quad (1.1) \end{aligned}$$

又因为斜距差与干涉相位的关系为

$$\phi = \frac{2\pi P \Delta R_1}{\lambda}, \quad (1.2)$$

其中, ϕ 表示绝对相位,即为解缠绕后的相位, λ 表示波长, P 表示雷达收发模式,乒乓模式 $P=2$,标准模式 $P=1$.

化简后,绝对相位 ϕ 与高程 h 的关系如下^[1,5,11], (此时绝对相位已经去除平地相位)

$$h = -\frac{\lambda R_1 \sin\theta}{2\pi P B_{\perp}^1} \phi, \quad (1.3)$$

其中, $B_{\perp}^1 = B_1 \cos(\theta - \alpha)$, 表示有效基线长度.

1.2 三基线相位解缠绕基本原理

根据三基线 InSAR 系统的成像几何原理,3 个天线对于同一地区在不同位置处观测得到 3 幅复图像数据,通过两两干涉处理,得到 3 幅缠绕相位图.下面以 3 幅缠绕相位图为例,介绍三基线相位解缠绕的基本原理.根据公式可以建立以下等式,

$$-\frac{\lambda R_1 \sin\theta_0}{4\pi B_{\perp}^1} \phi_1 = -\frac{\lambda R_1 \sin\theta_0}{4\pi B_{\perp}^2} \phi_2 = -\frac{\lambda R_1 \sin\theta_0}{4\pi B_{\perp}^3} \phi_3, \quad (1.4)$$

化简后,可以得到如下关系式

$$\frac{\phi_1}{B_{\perp}^1} = \frac{\phi_2}{B_{\perp}^2} = \frac{\phi_3}{B_{\perp}^3}, \quad (1.5)$$

其中, $\phi_i = \varphi_i + 2\pi k_i$, ($i=1,2,3$), φ_i 即为对应的缠绕相位,且 $-\pi \leq \varphi_i < \pi$, k_i 是整数,表示缠绕相位图的模糊数, B_{\perp}^i 表示有效基线长度.进一步化简后,可以得到^[11]

$$\frac{k_1 + \varphi_1/2\pi}{B_1} = \frac{k_2 + \varphi_2/2\pi}{B_2} = \frac{k_3 + \varphi_3/2\pi}{B_3}, \quad (1.6)$$

其中,基线长度 B_1, B_2, B_3 通过测量得到,缠绕相位 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 即为差分相位,都为已知量.此时,相位解缠绕就变成了求解模糊数 k_1, k_2, k_3 .根据中国余数定理,只要基线长度 B_1, B_2, B_3 两两互质,那么通过求解同余方程组就能够解得唯一解 k_1, k_2, k_3 .在求解模糊数的过程中只用到了中国余数定理,并不需要相邻像素相位连续性假设.因此,可以解决对高程突变区域的相位解缠绕问题.

2 基于聚类分析的三基线相位解缠绕方法

2.1 三基线的聚类分析

上一节已经介绍了三基线相位解缠绕的基本原理,由于实际的缠绕相位存在噪声的干扰,若每个像素只是简单地利用中国余数定理进行相位解缠绕,得到的解缠绕结果并不稳定.文献^[11]将聚类分析的方法引入到多基线相位解缠绕中,提高了相位解缠

绕的鲁棒性.

很显然,对于一幅缠绕相位图,同一条干涉条纹中的所有像素具有相同的模糊数.对于不同长度基线获取的缠绕相位图中的同一位置的像素来说,以模糊数向量 $[k_1, k_2, k_3]$ 和缠绕相位向量 $[\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]$ 来表示该像素值在不同缠绕相位图中的模糊数和缠绕相位信息.并且定义,将拥有相同模糊数向量的像素所组成的集合称为一个模糊组(Ambiguity-Set)^[11].

等式(1.6)中 φ_i 和 B_i 是已知量,因此,该方程可以看作是以 k_i 为变量的空间直线方程.很显然,场景中的每一个像素都对应一条空间直线,这条直线的方向向量为 $[B_1, B_2, B_3]$,并且过点 $(-\varphi_1/2\pi, -\varphi_2/2\pi, -\varphi_3/2\pi)$,而这3幅缠绕相位图对应的模糊数向量 $[k_1, k_2, k_3]$ 就是这条空间直线上的一个整数点.同一个模糊组内的所有像素都拥有相同的模糊数向量,而且它们对应直线的方向向量均为 $[B_1, B_2, B_3]$,因此,同一个模糊组内的所有像素对应的直线是相互重叠在一起的.该空间直线与割平面 $k_3=0$ 的交点 $[k_1, k_2]$ 为(割平面可以任取,为讨论方便起见,本文中的割平面取 $k_3=0$)

$$k_1 = \varphi_3/2\pi \frac{B_1}{B_3} - \varphi_1/2\pi, \quad (2.1)$$

$$k_2 = \varphi_3/2\pi \frac{B_2}{B_3} - \varphi_2/2\pi. \quad (2.2)$$

观察空间直线的方向向量和公式(2.1)、(2.2)可知,每个像素对应的空间直线的方向向量只跟基线长度有关,缠绕相位只影响该直线与割平面的交点位置,因此噪声只会使得该直线在割平面内平移.虽然噪声使得同一个模糊组内所有像素对应的直线不再严格重叠在一起,但是同一个模糊组内所有像素对应的直线仍然会围绕真实的位置聚集起来,即为聚类现象.此时,每一个模糊组的中心线即为该模糊组对应的在没有噪声情况下的空间直线.因此,只需要对空间直线与割平面的交点进行聚类分析,聚类中心即为没有噪声情况下的交点,然后可以根据公式(1.6)确定该空间直线.

利用直方图法来完成聚类,直方图的包络将是一个空间曲面,曲面波峰就是对应的聚类中心.文献^[11]通过识别直方图包络的波谷来分割波峰,完成所有像素的聚类.当所有波峰都是有效的聚类中心时,该方法能够正确地将所有的像素聚类.但是在实际数据的直方图包络中,并不是所有的波峰都是有效的,局部波峰的出现可使波峰数量大于模糊组数

量,导致分割出错误的波峰.实际场景中高程突变区域的像素比较少,形成的波峰容易受到附近波峰的干扰,波峰较难分割;并且,高程突变区域往往引起阴影,而该部分的相位噪声非常严重,这会影响到聚类结果的正确性.本文针对实际数据处理中的这些问题,给出了有效的解决方法.下面将详细介绍基于聚类分析的三基线相位解缠绕方法.

2.2 三基线相位解缠方法

由于毫米波雷达穿透性较差,孤立的树木和建筑物等会遮挡电磁波的传播,造成地面目标无法被照射到,引起地面阴影,这部分区域的相位噪声非常严重,将产生错误的缠绕相位,严重影响聚类分析的效果.为此,本文引入掩膜方法进行预处理,利用相干系数图,通过设置阈值,使相干系数低于该阈值的像素点不参与聚类分析,即将其舍弃.

为讨论方便起见,下面以表1中的基线参数为例来说明三基线相位解缠方法.表1中的3条基线以2:3:5两两互质,假设照射场景高度没有超出三基线的联合不模糊高程,根据比例关系可以计算得到8组模糊数向量,分别为 $[0\ 0\ 0]$ 、 $[0\ 0\ 1]$ 、 $[0\ 1\ 1]$ 、 $[0\ 1\ 2]$ 、 $[1\ 1\ 2]$ 、 $[1\ 1\ 3]$ 、 $[1\ 2\ 3]$ 、 $[1\ 2\ 4]$.从三基线的聚类分析中可以知道,在没有噪声的情况下,每一个模糊数向量对应直方图包络中的一个波峰,根据公式(2.1)、(2.2)可以计算得到每个波峰的位置.图2(a)表示在无噪声情况下的聚类现象,8个亮点表示波峰的位置,亮度表示该波峰对应模糊组的像素个数(由于不同模糊组像素个数差距较大,亮度差异较大,文中显示结果均经过取对数处理).有噪声情况下的聚类现象如图2(b)表示.

事实上,当InSAR系统基线参数已知,无噪声理想情况下,与模糊组对应的波峰位置即可确定并可作为先验信息.基于此先验信息,本文通过在理想位置周围选取极大值作为聚类中心,以解决分割波峰困难的问题.具体方法如下:

第1步,对理想情况下的8个波峰位置为中心分别加窗,以排除错误的波峰,窗口尺寸设为波峰之间的最小距离,防止窗口之间重叠.

第2步,设置阈值并统计窗中的像素个数,低于阈值的,不再求解极大值.该阈值的选择取决于待检测的像素最少模糊组的像素个数.

第3步,求解窗内的极大值.若该极大值的位置在窗口边缘,则还需要判断该极大值是否属于相邻窗口的聚类.若不是,则该极大值即为该窗口的波峰;若是,则说明该极大值不是这个窗口的波峰,缩

小该窗口大小,重复第 2 步和第 3 步。

第 4 步,根据得到的波峰位置(k_1, k_2)和公式(1.6)可以得到对应的空间直线,计算每个像素与各个空间直线的距离,以距离最近原则,确定每个像素所属的模糊组。

通过上述 4 步操作,能够有效地排除错误波峰的影响,获取正确的波峰位置,同时确定该模糊组的模糊数向量。

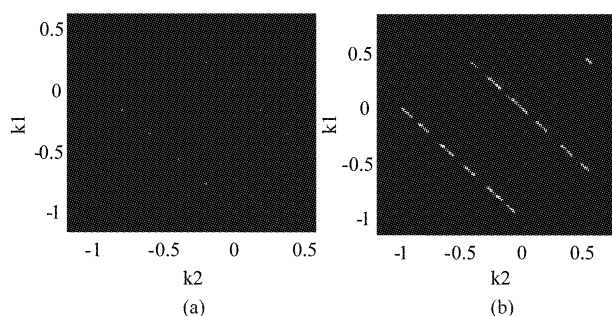


图 2 聚类现象 (a) 无噪声的情况, (b) 有噪声的情况
Fig. 2 Clustering phenomenon (a) In the absence of noise, and (b) in the presence of noise

图 3 给出了基于聚类分析的三基线相位解缠算法流程图。需要说明的是,直方图统计是对每个像素对应的空间直线在 $k_3 = 0$ 割平面上的交点进行统计,需要将 k_1, k_2 轴分成若干个等间隔的小区间,该间隔太大,会导致多个聚类中心合并成一个;间隔太小,使得曲面比较平坦,波峰不明显。本文选择的间隔为波峰之间最近距离的 1/20。

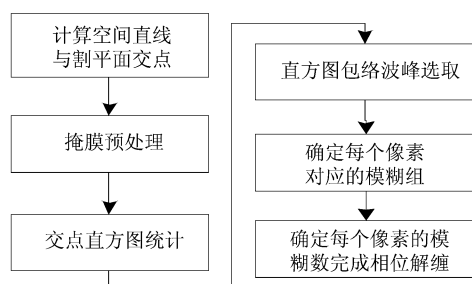


图 3 算法流程图
Fig. 3 Flow chart of the algorithm

3 仿真数据处理

仿真中的 InSAR 系统参数如表 1 所示。仿真地形如图 4 所示,平地场景尺寸为 200 m × 300 m,场景中设置了一个高 60 m,底面半径为 30 m 的圆柱,为简单起见,场景中散射点的散射系数均设为 1。

表 1 InSAR 系统参数

Table 1 InSAR system parameters

项目	参数	项目	参数
中心频率 f_0	35 GHz	基线与水平方向夹角 α	0°
基线长度 B	1 m, 0.6 m, 0.4 m	系统带宽	400 MHz
天线下视角 θ	35°	波束宽度	3° × 3°
AD 采样率	600 MHz	脉冲宽度	12 μs
系统 PRF	12 kHz	单通道 PRF	4 kHz
方位向带宽	500 Hz	距离向分辨率	0.375 m
载机高度	3 000 m	场景中心斜距	3 662 m

在表 1 的参数条件下,由公式(1.3)可知,对应 0.4 m、0.6 m 和 1 m 基线的不模糊高程分别为 54.196 1 m、36.130 7 m 和 21.678 4 m。根据中国余数定理,可将不模糊高程范围扩大为原来的 2 倍、3 倍和 5 倍,系统的不模糊高程范围可提高到 108.39 m。

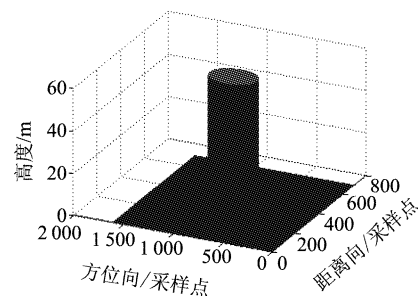


图 4 仿真地形
Fig. 4 Simulated terrain

图 5 是使用传统的单基线相位解缠绕方法解缠绕后获得的高程反演结果(这里仅使用质量图导引法^[12])。从图中可以看出对 60 m 高的圆柱的 3 个反演高度分别为 5.5 m、-10 m 和 -3.8 m。显然,当目标高程突变时,传统的单基线相位解缠绕方法将不能得到准确的绝对相位,并会导致错误的高程反演。

图 6 是每个像素对应的空间直线与割平面 $k_3 = 0$ 的交点(k_1, k_2)。从图中可以看出,阴影部分的相位噪声比较明显。

图 7 分别是无掩膜预处理和有掩膜预处理的情况下,使用直方图统计的聚类现象。从图 7(a)中可以看出,不做掩膜预处理,阴影区域的错误相位使得直方图统计结果不准确,影响波峰的选取。从图 7(b)中可以看出,在掩膜预处理后直方图,统计结果更准确。掩膜预处理的阈值设为 0.5,即相干系数小于 0.5 的像素不参与聚类。

图 8 表示直方图包络的局部极大值。图 9 中用五角星标记的位置即为使用本文方法获得的波峰。设置像素最少模糊组的像素个数为 5 m × 5 m 区域

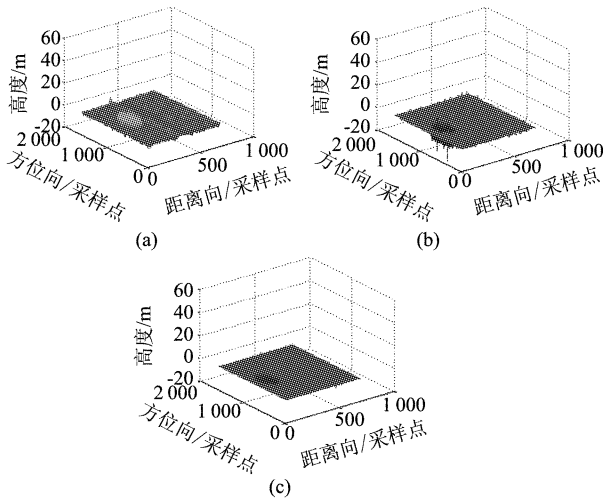


图 5 高程反演(单基线相位解缠绕) (a)0.4 m 基线 (b) 0.6 m 基线(c) 1 m 基线
 Fig. 5 Reconstructed DEM (single-baseline phase unwrapping) (a) 0.4 m baseline (b) 0.6 m baseline (c) 1 m baseline

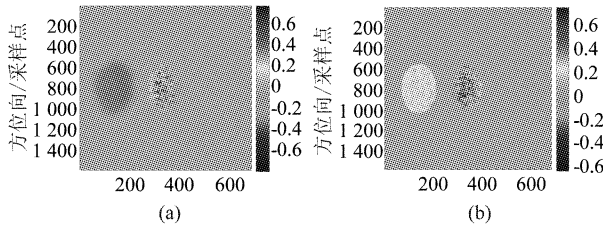


图 6 以 $k_3 = 0$ 为割平面的交点 (k_1, k_2) (a) k_1 (b) k_2
 Fig. 6 The cross point (k_1, k_2) taking the $k_3 = 0$ plane as the cut plane (a) k_1 (b) k_2

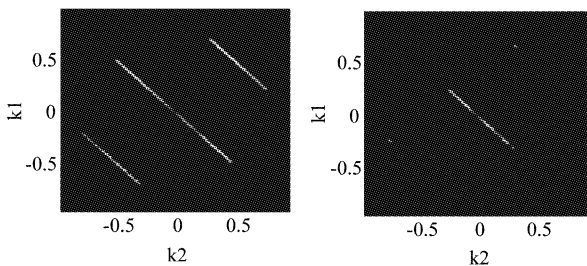


图 7 聚类现象 (a) 无掩膜处理, (b) 掩膜处理
 Fig. 7 Clustering phenomenon (a) In the absence of masking, and (b) in the presence of masking

内包含的所有像素,即能检测到的最小的聚类.

图 10 是采用本文处理方法获得的三基线对应的高程反演结果. 圆柱的反演高度分别为 58.8468 m、59.1697 m 和 59.4077 m, 与真实的圆柱高度 60 m 基本一致.

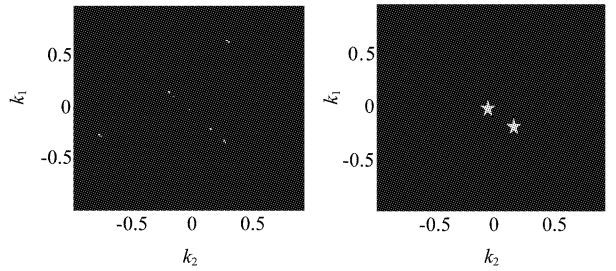


图 8 局部极大值
 Fig. 8 Local maximum

图 9 波峰选取情况
 Fig. 9 Peaks selection

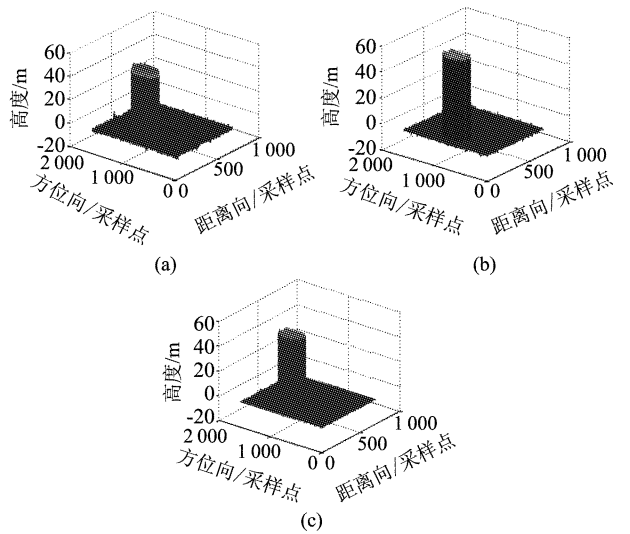


图 10 高程反演(三基线相位解缠绕) (a)0.4 m 基线, (b)0.6 m 基线, (c)1 m 基线
 Fig. 10 Reconstructed DEM (Multi-baseline phase unwrapping) (a) 0.4 m baseline, (b) 0.6 m baseline, (c) 1 m baseline

4 实际数据处理

本文实际数据来自中科院电子所研制的三基线毫米波 InSAR 原理样机在陕西阎良地区的飞行试验. 在选取的场景中, 孤立的树木形成了高程突变区域, 可用于对本文方法的验证. 下面分别给出了单基线相位解缠绕和三基线相位解缠绕的处理结果. 毫米波三基线 InSAR 系统的具体参数如表 1 所示.

图 11 分别是场景中每个像素对应的空间直线与割平面 $k_3 = 0$ 的交点 (k_1, k_3) . 从图 11 中可以看出, 交点 (k_1, k_3) 只出现在少数几个值附近, 表明模糊组的个数较少, 有利于聚类分析.

图 12 是无掩膜预处理和有掩膜预处理的情况下, 分别使用直方图统计的聚类现象. 很显然, 掩膜预处理后的统计结果更准确. 掩膜预处理的阈值与仿真参数一致.

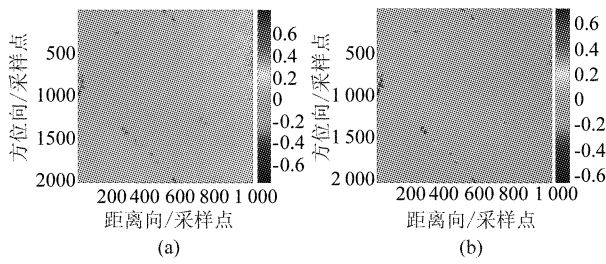


图 11 以 $k_3 = 0$ 为割平面的交点 (k_1, k_2) (a) k_1 , (b) k_2
 Fig. 11 The cross point (k_1, k_2) taking the $k_3 = 0$ plane as the cut plane (a) k_1 , (b) k_2

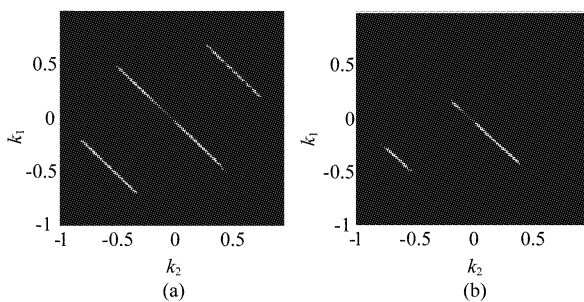


图 12 聚类现象 (a) 无掩膜处理, (b) 掩膜处理
 Fig. 12 Clustering phenomenon (a) In the absence of masking, and (b) in the presence of masking

图 13 表示直方图包络的局部极大值. 从图中可以看出, 局部极大值多于模糊组的个数, 由于高程突变所在模糊组的像素较少, 而平地所在的模糊组像素较多, 两者相差悬殊, 因此, 通过寻找波谷来分割波峰将变得困难. 图 14 中用五角星标记的位置即为使用本文方法获得的波峰.

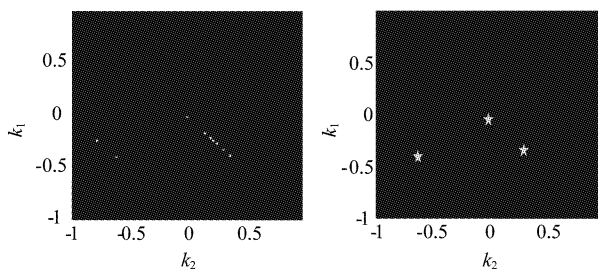


图 13 局部极大值
 Fig. 13 Local maximum
 图 14 波峰选取情况
 Fig. 14 Peaks selection

图 15 是用颜色表示高度的高程反演结果. 用矩形框选取 3 个目标, 并将放大后的图显示在右侧. 其中 (a)、(b)、(c) 是使用传统的单基线相位解缠绕方法解缠绕后获得的高程反演结果 (仅使用质量图导引法^[12]). 从 (a) 中可以看出 3 个目标的高度没有

超过 0.4 m 基线的不模糊高程的一半, 很明显, 这 3 个目标区域是树冠部分; 而 (b) 和 (c) 中的高程反演结果在该区域发生了突变, 树冠高度反演结果错误, 显然树冠部分的相位解缠绕错误导致该区域高程反演错误.

图 15 中 (d)、(e)、(f) 是采用本文处理方法获得的三基线对应的高程反演结果. 从图中可以看出 3 个目标高程反演结果没有突变的现象, 比较一致. 将不同基线中的测量结果做平均, 可以得到 3 个目标的高度分别为 20.645 m、27.215 m 和 24.58 m.

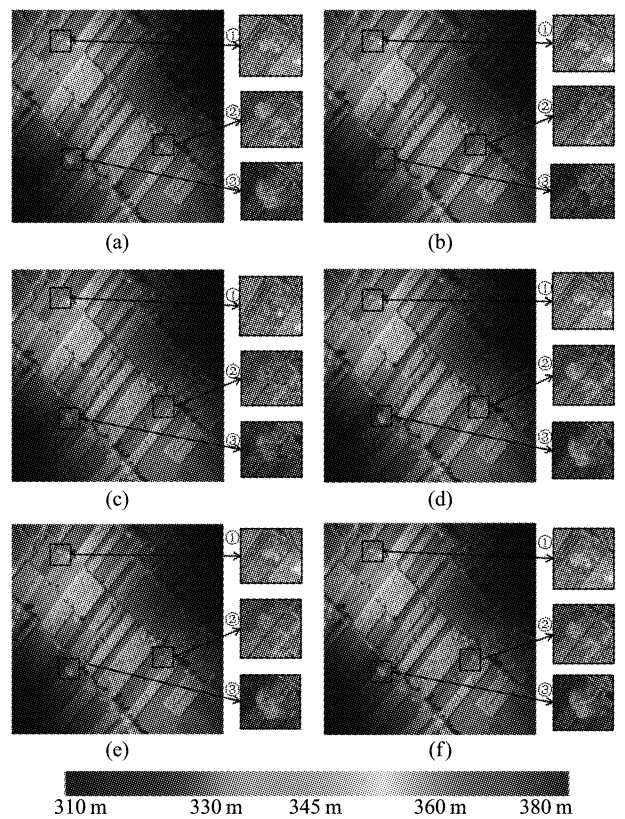


图 15 反演高程 (a) 0.4 m 基线, (b) 0.6 m 基线, (c) 1 m 基线 (a, b, c 为单基线相位解缠绕); (d) 0.4 m 基线, (e) 0.6 m 基线, (f) 1 m 基线 (d, e, f 为三基线相位解缠绕)
 Fig. 15 Reconstructed DEM (a) 0.4 m baseline, (b) 0.6 m baseline, (c) 1 m baseline (a, b, c by single-baseline phase unwrapping); (d) 0.4 m baseline, (e) 0.6 m baseline, (f) 1 m baseline (d, e, f by three-baseline phase unwrapping)

5 结论

针对实际数据存在的噪声干扰问题, 改进了基于聚类分析的三基线相位解缠绕方法, 解决了场景高程突变区域的高程反演问题, 并得到了较好的地形高程反演结果. 本文的研究工作, 对 InSAR 数据

处理和应用具有重要的参考价值.

REFERENCES

- [1] WANG Chao, ZHANG Hong, LIU Zhi, *et al.* *Spaceborne synthetic aperture radar interferometry* [M]. Beijing: Science press (王超,张红,刘智等. 星载合成孔径雷达干涉测量. 北京:科学出版社), 2002. 1-37.
- [2] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, **88**(3): 333-382.
- [3] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software [M]. New York: Wiley, 1998. 4-5.
- [4] Goldstein R, Zebker H, Werner C. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, **23**(4): 713-720.
- [5] Xu W, Chang E C, Kwok L K, *et al.* Phase-unwrapping of SAR interferogram with multi-frequency or multi-baseline [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Canada, 1994, 2: 730-732.
- [6] Brehm T, Wahlen A, Essen H. High resolution millimeter wave SAR [C]. European Radar Conference, Amsterdam, 2004: 217-220.
- [7] Magnard C, Meier E, Ruegg M, *et al.* High resolution millimeter wave SAR interferometry [C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, 2007: 5061-5064.
- [8] LI Dao-Jing, LIU Bo, PAN Zhou-Hao, *et al.* Airborne MMW InSAR interferometry with cross-track three-baseline antennas [C]. *9th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2012: 301-303.
- [9] LIU Bo, PAN Zhou-Hao, LI Dao-Jing, *et al.* Moving target detection and location based on millimeter wave InSAR imaging [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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. 红外与毫米波学报), 2012, **31**(3): 258-264.
- [10] 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* (潘舟浩, 刘波, 李道京, 乔明. 毫米波三基线 InSAR 系统误差校正和信号分析. 电子与信息学报), 2011, **33**(10): 2464-2470.
- [11] Yu Hanwen, Li Zhenfang, Bao Zheng. A Cluster-Analysis-Based Efficient Multibaseline Phase-Unwrapping Algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(1): 478-487.
- [12] Prati C, Giani M, Leuratti N. A 2-d phase unwrapping technique based on phase and absolute values information [C]. *Proceedings of the 1990 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1990: 2043-2046.
-
- (上接 449 页)
- [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, **48**(7): 2967-2979.
- [2] BRUNNER D, LEMOINE G, BRUZZONE L, *et al.* Building Height Retrieval From VHR SAR Imagery Based on an Iterative Simulation and Matching Technique [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(3): 1487-1504.
- [3] SOERGEL, E M, A T, *et al.* Stereo Analysis of High-resolution SAR Images for Building Height Estimation in Cases of Orthogonal Aspect Directions [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, **64**(5): 490-500.
- [4] THIELE A, CADARIO E, SCHULZ K, *et al.* Analysis of Gable-Roofed Building Signature in Multiaspect InSAR Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, **7**(1): 83-87.
- [5] FENG X, YA-QIU J. Automatic Reconstruction of Building Objects From Multiaspect Meter-Resolution SAR Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(7): 2336-2353.
- [6] BRENNER A R, ROESSING L. Radar Imaging of Urban Areas by Means of Very High-Resolution SAR and Interferometric SAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(10): 2971-2982.
- [7] TISON C, TUPIN F, MAITRE H. A fusion scheme for joint retrieval of urban height map and classification from high-resolution interferometric SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(2): 496-505.
- [8] TUPIN F. Extraction of 3D information using overlay detection on SAR images [J]. *2nd Grss/Isprs Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, 2003: 72-76.
- [9] FERRO A, BRUNNER D, BRUZZONE L, *et al.* On the Relationship Between Double Bounce and the Orientation of Buildings in VHR SAR Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, **8**(99): 612-616.
- [10] WANG G, ZHANG F, ZI W, *et al.* High resolution SAR image simulation for buildings based on ray tracing algorithm: Proc. SPIE 8006, 80060G (2011), 2011 [C], Guilin, China 2011.
- [11] SVALBE I. Exact, scaled image rotations in finite Radon transform space [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, **32**(9): 1415-1420.
- [12] CHENG J, JIN T, KU X, *et al.* Road junction extraction in high-resolution SAR images via morphological detection and shape identification [J]. *Remote Sensing Letters*, 2012, **4**(3): 296-305.