



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108872989 A

(43)申请公布日 2018.11.23

(21)申请号 201810778131.0

(22)申请日 2018.07.16

(71)申请人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72)发明人 徐华平 罗尧 杨波 宋泽宁
李春升

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限公司 11251

代理人 杨学明 卢纪

(51)Int.Cl.

G01S 13/90(2006.01)

G01C 5/00(2006.01)

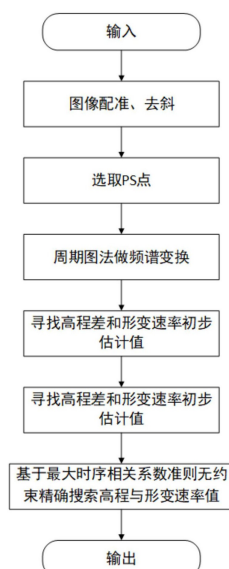
权利要求书2页 说明书4页 附图5页

(54)发明名称

一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索方法,涉及信号处理领域,针对星载SAR对场景高程和形变速率测量精度的指标,提出一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索方法。该方法主要包括三个步骤,步骤一:对星载长时间序列差分干涉图像进行相位滤波,利用离差振幅准则筛选出永久散射体像素;步骤二:基于最大周期图准则粗估计永久散射体的高程与形变速率值;步骤三:以最大周期图粗估计的结果作为初始值,利用基于最大时序相关系数准则无约束精确搜索高程与形变速率值。



1. 一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤一:对长时间序列差分干涉图像进行相位滤波,利用离差振幅准则筛选出永久散射体像素;

步骤二:基于最大周期图准则粗估计永久散射体的高程与形变速率值;

步骤三:以最大周期图粗估计的结果作为初始值,基于最大时序相关系数准则无约束精确搜索高程与形变速率值。

2. 根据权利要求1所述的一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索方法,其特征在于:步骤一具体为:对M幅长时间序列SAR单视复图像进行配准、差分干涉操作以及差分干涉相位滤波,得到处理后的差分干涉SAR图像,接着,计算出每一幅观测图像的归一化幅度方差 μ 为:

$$\mu = 1 - \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |g_m| \right)^2 / \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |g_m|^2 \right) \quad (1.1)$$

其中,M为长时间序列SAR单视复图像的总幅数, g_m 为第m幅差分干涉SAR图像,而振幅离差指数 D_A 与归一化振幅方差 μ 存在以下关系:

$$D_A = 1 / (1 - \mu) - 1 \quad (1.2)$$

设定一定的阈值k,某个像素的振幅离差指数小于阈值,则将该像素选为永久散射体像素。

3. 根据权利要求1所述的一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索方法,其特征在于:步骤二具体为:PS-InSAR解决的是以下目标函数的估计问题,

$$\{\hat{h}, \hat{v}\} = \arg \max \left\{ \left| \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{g_m^*}{|g_m|} \exp \left[-j \left(\frac{4\pi b_{\perp m} h}{\lambda r \sin \theta} + \frac{4\pi t_m v}{\lambda} \right) \right] \right| \right\} = \arg \max \gamma_p(h, v) \quad (1.3)$$

其中,M为长时间序列SAR单视复图像的总幅数, λ 为电磁波的波长, g_m 为第m幅差分干涉SAR图像, $b_{\perp m}$ 为垂直基线, r 和 θ 为PS点与主卫星天线对应的斜距和侧视角, t_m 为辅图像与主图像的成像时间间隔, h 为PS点的高程值, v 为PS点沿雷达视线方向上的形变速率值,为了精确估计以上时序相关系数 $\gamma_p(h, v)$ 最大时的高程 h 及形变速率 v ,首先,利用最大化周期图法,解出每一幅长时间序列差分干涉图像的周期图谱估计:

$$\{\hat{h}, \hat{v}\} = \text{peaks} \left\{ \left| \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M g_m \exp \left[-j \left(\frac{4\pi b_{\perp m} h}{\lambda r \sin \theta} + \frac{4\pi t_m v}{\lambda} \right) \right] \right| \right\} \quad (1.4)$$

经过傅里叶变换将复信号从 t - b 空间变换到 h - v 空间,然后将频谱峰值处对应的高程 \hat{h} 和形变速率 \hat{v} 作为最大化时序相关系数这一目标函数的初步估计值。

4. 根据权利要求1所述的一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索方法,其特征在于:步骤三:重新建立目标函数,

$$f_p(h, v) = -|\gamma_p(h, v)|^2 \quad (1.5)$$

$\gamma_p(h, v)$ 为时序相关系数, h 为PS点的高程值, v 为PS点沿雷达视线方向上的形变速率值,将目标函数 γ_p 的最大化问题转化为 f_p 的最小化问题,采用拟牛顿法,

$$H_{i+1}[\nabla f_p(h_{i+1}, v_{i+1}) - \nabla f_p(h_i, v_i)] = (h_{i+1}, v_{i+1}) - (h_i, v_i) = d \quad (1.6)$$

其中,以 d 为搜索方向, H_{i+1} 为 f_p 的Hesse矩阵的逆矩阵的一个近似矩阵,将初始值作为搜

索的起始点,调用Matlab里的fminunc求解最优问题,以获得精确的高程和形变速率测量值。

一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索方法

技术领域

[0001] 本发明属于信号处理领域,具体涉及一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索方法。

背景技术

[0002] 合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)是一种极具发展前景的地表形变检测技术,同时具有合成孔径雷达技术和干涉测量技术的优点,能够实现全天时、全天候工作,具备强穿透能力并且可以大面积、高精度地测量地面目标的三维信息和形变信息。但InSAR技术对大气误差、遥感卫星轨道误差、地表状况以及时空不相关等因素非常敏感。所以1999年意大利学者Ferrettit和Rocca提出永久散射体技术,既摆脱了空间失相关与时间失相关约束,同时因为有大量的SAR数据可供使用,大气误差得以估计与纠正。PS技术大大增强了干涉测量的环境适应能力及其精度,是干涉研究领域的一项重大技术突破,具有巨大的实际应用潜力。

[0003] 基于永久散射体的合成孔径雷达差分干涉测量(PS-InSAR)技术本质上属于干涉测量,时间序列上的多幅SAR图像以其中一幅作为主图像,经过图像配准之后,干涉形成一个时间序列干涉相位;利用轨道和外部的DEM去除平地效应和地形效应,形成时间序列的差分干涉相位。其中干涉相位主要由高程引起的相位、地形形变引起的相位、大气延迟引起的相位的缠绕值组成,将PS点的每个干涉相位分量从缠绕的相位中分离出来是精确估计高程和形变的关键。

[0004] 当前,基于PS-InSAR对高程和形变速率估计的精确搜索方法受到广泛关注。其中比较常见的方法有基于最大时序相关系数的无约束搜索法和最大周期图法。基于最大时序相关系数的无约束搜索法是利用拟牛顿法的原理寻找目标函数的最优值,该方法的计算量小,并且收敛速度快,但稳定性不足,受初始值的设定影响很大;最大周期图法是对复信号进行频谱变换,从 t - b 空间变换到 h - v 空间,寻找频谱峰值处对应的值作为最优值,不需要初始值的设定,并且估计精度较高且鲁棒性较好,但相位噪声对估计结果影响较大。

[0005] 随着地表形变监测需求的应用范围拓宽,应用要求提高,对精度的要求也不断升高,需要提出新的搜索方法对高程差和形变速率进行更加精确的估计。本发明结合最大周期法和基于最大时序相关系数的无约束搜索法,以最大周期图粗估计的结果作为初始值,基于最大时序相关系数准则无约束精确搜索高程与形变速率值。因为基于最大时序相关系数的无约束搜索法可以抑制噪声,所以,高程和形变速率的估计精度可以进一步提高。

发明内容

[0006] 本发明的主要目的是为了解决上述问题,提出了一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法,利用本发明可以进一步提高对场景的高程和形变速率的估计精度。

[0007] 本发明提供了一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索方法,主要包括以下几个步骤:

[0008] 步骤一：对长时间序列差分干涉图像进行相位滤波，利用离差振幅准则筛选出永久散射体像素；

[0009] 步骤二：基于最大周期图准则粗估计永久散射体的高程与形变速率值；

[0010] 步骤三：以最大周期图粗估计的结果作为初始值，基于最大时序相关系数准则无约束精确搜索高程与形变速率值。

[0011] 本发明基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法的优点在于：

[0012] (1) 实用性。本发明提出的基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法是在现有方法的基础上进行，实现难度降低。

[0013] (2) 有效性。本发明提出的基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法能够有效地针对场景中的强点目标进行高精度的高程和形变速率估计。

附图说明

[0014] 图1是基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法的流程图。

[0015] 图2是仿真地形的SAR图像和高程图，其中，图2(a)为仿真地形的原始SAR图像，图2(b)为仿真地形的高程图。

[0016] 图3是三种不同搜索方法对仿真地形高程的重构结果，其中，图3(a)为基于最大时序相关系数的无约束搜索法，图3(b)为最大周期图法，图3(c)为基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法。

[0017] 图4是三种不同搜索方法对仿真地形形变速率的重构结果，其中，图4(a)为基于最大时序相关系数的无约束搜索法，图4(b)为最大周期图法，图4(c)为基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法。

具体实施方式

[0018] 下面将结合附图和实施例对本发明作进一步的详细说明。

[0019] 本发明是一种基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索方法，方法流程图如图1所示，具体包括以下步骤：

[0020] 步骤一：对M幅长时间序列SAR单视复图像进行配准、差分干涉操作以及差分干涉相位滤波，得到处理后的差分干涉SAR图像。接着，计算出每一幅观测图像的归一化幅度方差为：

$$[0021] \quad \mu = 1 - \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |g_m| \right)^2 / \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |g_m|^2 \right) \quad (1.1)$$

[0022] 其中，M为长时间序列SAR单视复图像的总幅数， g_m 为第m幅差分干涉SAR图像。而振幅离差指数 D_A 与归一化振幅方差 μ 存在以下关系：

$$[0023] \quad D_A = 1 / (1 - \mu) - 1 \quad (1.2)$$

[0024] 设定一定的阈值k，某个像素的振幅离差指数小于阈值，则将该像素选为永久散射体像素；

[0025] 步骤二：PS-InSAR解决的是以下目标函数的估计问题，

$$[0026] \quad \{\hat{h}, \hat{v}\} = \arg \max \left\{ \left| \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{g_m^*}{|g_m|} \exp \left[-j \left(\frac{4\pi b_{\perp m} h}{\lambda r \sin \theta} + \frac{4\pi t_m v}{\lambda} \right) \right] \right| \right\} = \arg \max \gamma_p(h, v) \quad (1.3)$$

[0027] 其中, M 为长时间序列SAR单视复图像的总幅数, λ 为电磁波的波长, g_m 为第 m 幅差分干涉SAR图像, $b_{\perp m}$ 为垂直基线, r 和 θ 为PS点与主卫星天线对应的斜距和侧视角, t_m 为辅图像与主图像的成像时间间隔, h 为PS点的高程值, v 为PS点沿雷达视线方向上的形变速率值, 为了精确估计以上时序相关系数 $\gamma_p(h, v)$ 最大时的高程 h 及形变速率 v , 首先, 利用最大化周期图法, 解出每一幅长时间序列差分干涉图像的周期图谱估计:

$$[0028] \quad \{\hat{h}, \hat{v}\} = peaks \left\{ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M g_m \exp \left[-j \left(\frac{4\pi b_{\perp m} h}{\lambda r \sin \theta} + \frac{4\pi t_m v}{\lambda} \right) \right] \right\} \quad (1.4)$$

[0029] 经过傅里叶变换将复信号从 t - b 空间变换到 h - v 空间, 然后将频谱峰值处对应的高程 \hat{h} 和形变速率 \hat{v} 作为最大化时序相关系数这一目标函数的初步估计值;

[0030] 步骤三: 重新建立目标函数,

$$[0031] \quad f_p(h, v) = -|\gamma_p(h, v)|^2 \quad (1.5)$$

[0032] $\gamma_p(h, v)$ 为时序相关系数, h 为PS点的高程值, v 为PS点沿雷达视线方向上的形变速率值, 将目标函数 γ_p 的最大化问题转化为 f_p 的最小化问题, 采用拟牛顿法,

$$[0033] \quad H_{i+1}[\nabla f_p(h_{i+1}, v_{i+1}) - \nabla f_p(h_i, v_i)] = (h_{i+1}, v_{i+1}) - (h_i, v_i) = d \quad (1.6)$$

[0034] 其中, 以 d 为搜索方向, H_{i+1} 为 f_p 的Hesse矩阵的逆矩阵的一个近似矩阵, 将初始值作为搜索的起始点, 调用Matlab里的fminunc求解最优问题, 以获得精确的高程和形变速率测量值。

[0035] 实施实例

[0036] 为说明本发明的有效性, 进行如下单个控制点和仿真地形的验证实验, 实例的仿真参数如表1所示, 表2给出了三种不同的方法(包括: 基于最大时序相关系数的无约束搜索法、最大周期图法、基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法)估计单个控制点高程和形变速率耗时和精度的对比结果, 表3给出了上述三种方法估计仿真地形高程和形变速率的相对精度的对比, 图2给出了仿真地形的SAR图像以及仿真地形高程图, 图3和图4分别给出了重构结果。

[0037] 表1实施实例的部分仿真参数

[0038]

参数	取值
卫星个数	45
最长基线	528m
主星高程	639.89Km
工作波长 λ (m)	0.0311

[0039] 利用表1的参数, 首先随机设定单个控制点的高程和形变速率, 采用不同的方法进行估计, 循环一千次的耗时、高程精度、形变速率精度、平均目标函数值的统计平均值如表2所示, 通过比较可知, 基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法虽然耗时稍微长一些, 但是估

计精度和平均目标函数值的结果是最优的;然后利用以上三种方法对仿真地形的高程和形变速率的进行估计,进一步仿真验证,将形变速率设置为0,基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法对仿真地形高程和形变速率估计的相对精度同样是最优的,并且对仿真地形的高程和形变速率进行重构,从高程重构结果中可以看出,基于最大时序相关系数的无约束搜索法重构结果最差,看不出明显的地形起伏;最大周期图法和基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法对高程的重构图像接近且最优;从形变速率重构结果中可以看出,基于最大时序相关系数的无约束搜索法重构结果同样是最差,只有地形吧边缘的形变速率的估计精度比较好;最大周期图法和基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法能精确估计整个仿真地形的形变速率;上述仿真结果有效地证明了本发明的基于最大周期图的PS-InSAR精确搜索法的有效性及其实用性,能够有效地提高对永久散射体的高程和形变速率的估计精度。

[0040] 表2三种不同方法估计控制点高程和形变速率耗时和精度的对比结果

[0041]

各种方法的耗时及精度对比	基于最大时序相关系数的无约束搜索法	最大周期图法	基于最大周期图的PS-InSAR 精确搜索法
耗时	0.0444s	1.3764s	1.4741s
高程精度	88.7472m	0.1312m	0.1174m
形变速率精度	0.8231m/yr	0.0002m/yr	0.00015m/yr
平均目标函数值	0.8231	0.9722	0.9863

[0042] 表3三种不同方法估计仿真地形高程和形变速率相对精度的对比结果

[0043]

各种方法精度对比	基于最大时序相关系数的无约束搜索法	最大周期图法	基于最大周期图的PS-InSAR 精确搜索法
高程精度	49.7820m	1.0129m	1.0117m
形变速率精度	0.0001m/yr	0.0046m/yr	0.0001m/yr

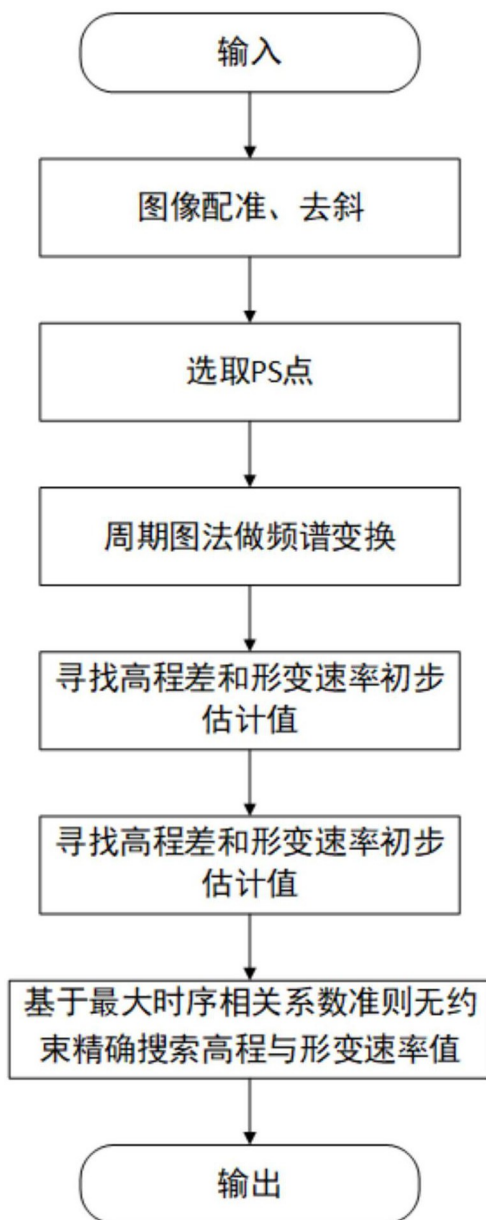
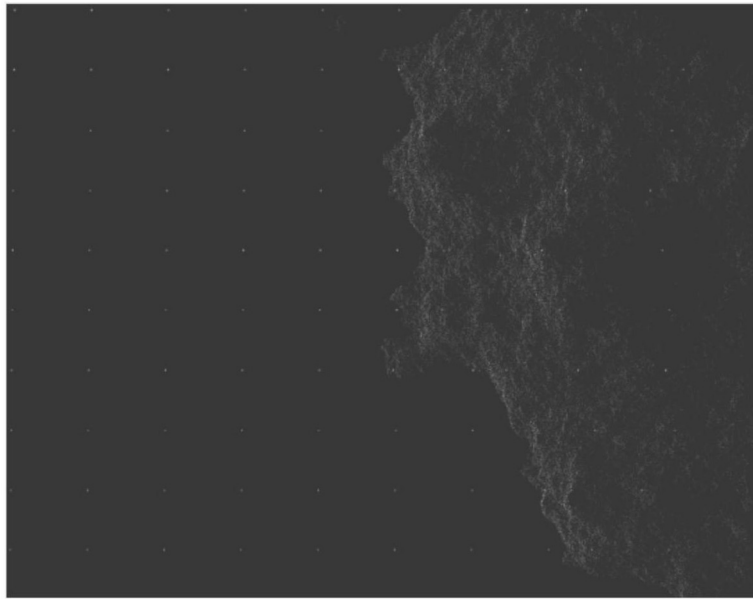
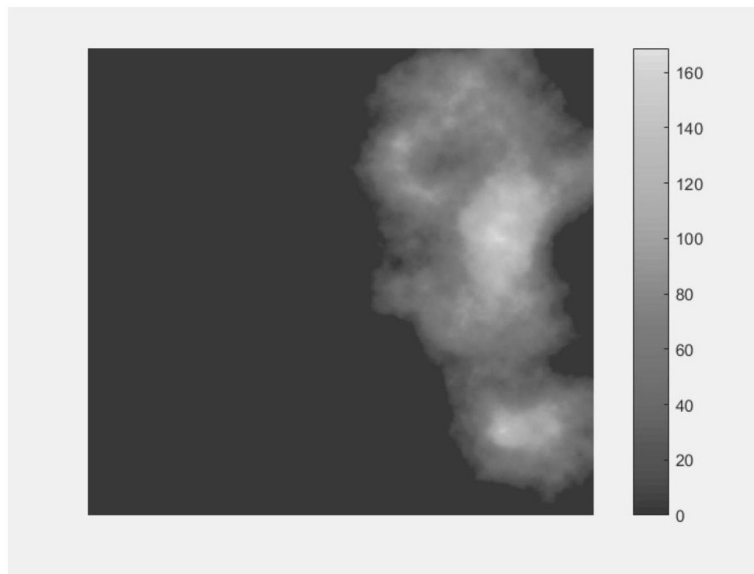


图1

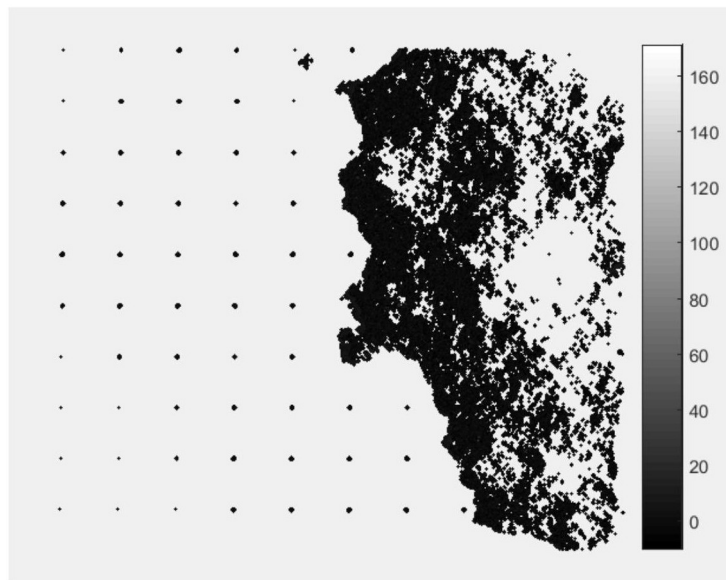


(a)

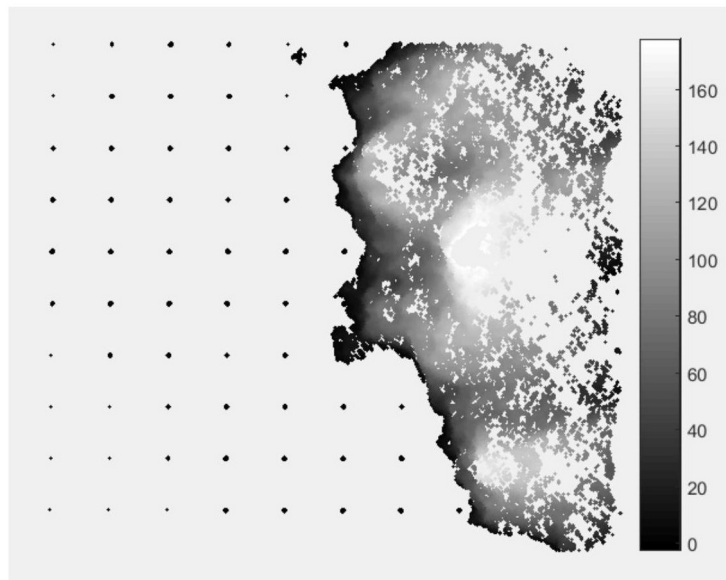


(b)

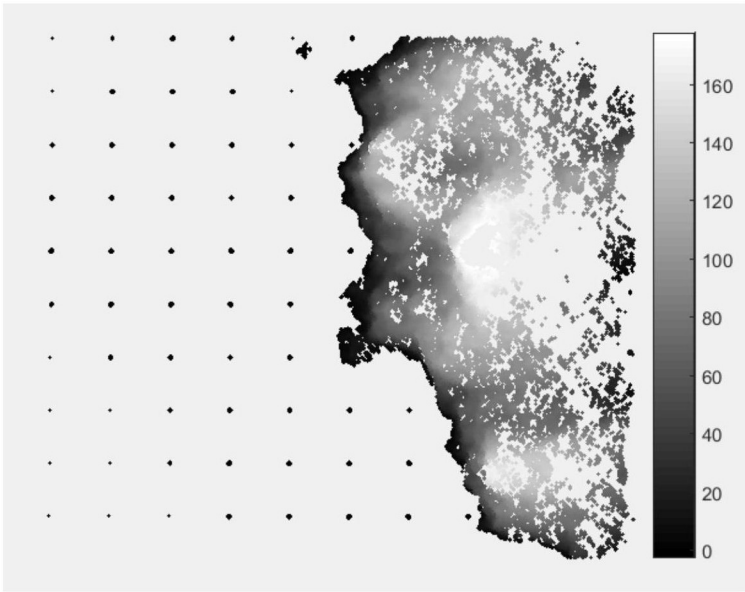
图2



(a)

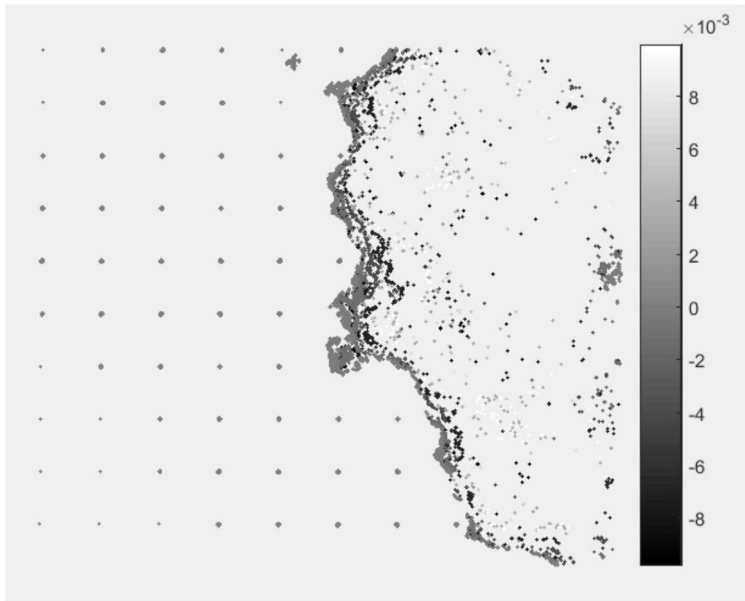


(b)

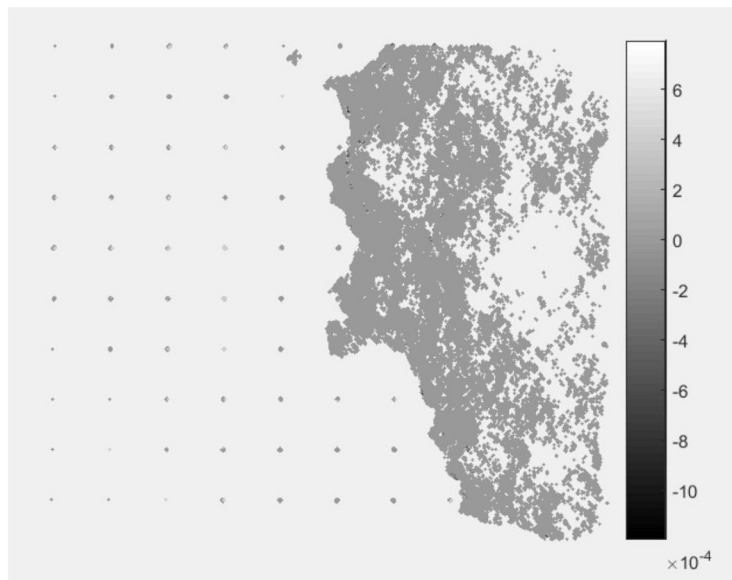


(c)

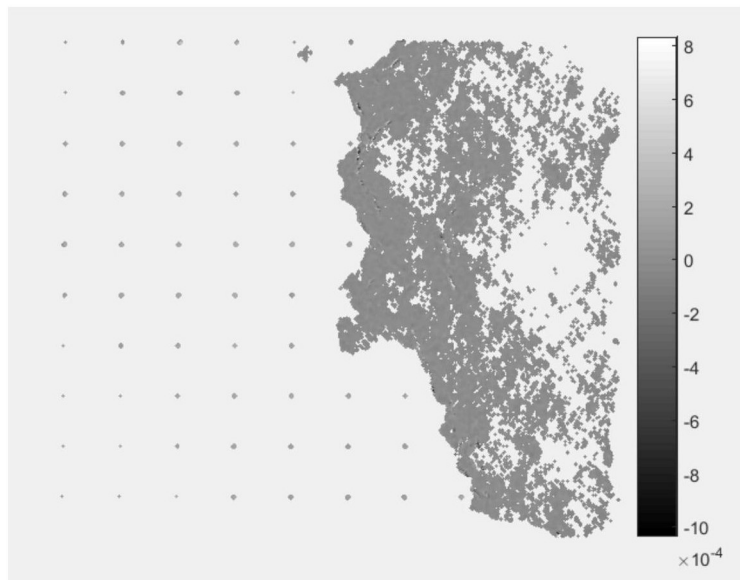
图3



(a)



(b)



(c)

图4