(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2020 年 11 月 26 日 (26.11.2020)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2020/233591 A1

(51) 国际专利分类号:
*G01S 13/90* (2006.01) *G01B 15/06* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/091273

(22) 国际申请日: 2020 年 5 月 20 日 (20.05.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201910423735.8 2019年5月21日 (21.05.2019) CN

(71) 申请人: 中 南 大 学 (**CENTRAL SOUTH UNIVERSITY**) [CN/CN]; 中国湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, Hunan 410000 (CN)。

(72) 发明人: **胡俊 (HU, Jun)**; 中国湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, Hunan 410000 (CN)。 **刘计洪 (LIU, Jihong)**; 中国湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, Hunan 410000 (CN)。 **李志伟 (LI, Zhiwei)**; 中国湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, Hunan 410000 (CN)。 **朱建军 (ZHU, Jianjun)**; 中国湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, Hunan 410000 (CN)。

(74) 代理人: 长沙轩荣专利代理有限公司 (**CHANGSHA XUAN RONG PATENT AGENCY CO., LTD.**); 中国湖南省长沙市天心区芙蓉中路三段380号汇金苑9栋537房, Hunan 410000 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) **Title:** INSAR AND GNSS WEIGHTING METHOD FOR THREE-DIMENSIONAL EARTH SURFACE DEFORMATION ESTIMATION

(54) 发明名称: 一种面向三维地表形变估计的InSAR和GNSS定权方法

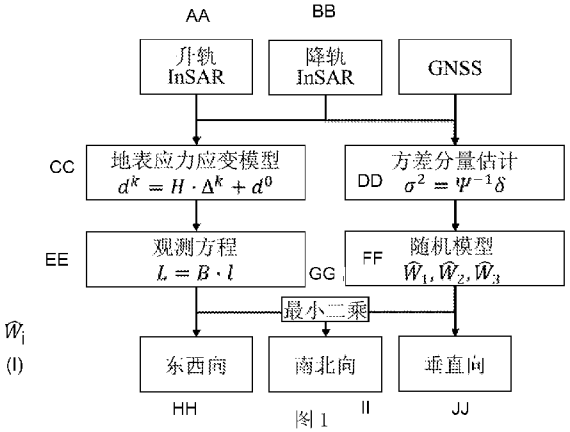


图 1

AA ASCENDING
BB DESCENDING
CC EARTH SURFACE STRESS-STRAIN MODEL
DD VARIANCE COMPONENT ESTIMATION
EE OBSERVATION EQUATION
FF RANDOM MODEL
GG LEAST SQUARES
HH EAST-WEST DIRECTION
II NORTH-SOUTH DIRECTION
JJ VERTICAL DIMENSION

(57) **Abstract:** Disclosed is an InSAR and GNSS weighting method for three-dimensional earth surface deformation estimation, including the following steps: step 1: establishing a functional relationship between a three-dimensional deformation $d^0$ of an unknown point and a certain amount of InSAR/GNSS data $L_i$ of surrounding points based on an earth surface stress-strain model and an observed value imaging geometry by using the ascending and descending InSAR data and the GNSS data of an area to be monitored; step 2: performing relative weighting on $K_i$ observed data inside the observed value $L_i$ of the ascending and descending InSAR and GNSS, and determining an initial weight matrix $W_i$ of various observed values of InSAR/GNSS; step 3: determining the precise weight matrix equation (I) between various observed values of InSAR/GNSS by using variance component estimation, and solving the high-precision three-dimensional earth surface deformation $d^0$ based on the criterion of least squares; and step 4: making each earth surface point undergo the above steps 1-3 to realize the fusion of InSAR and GNSS to estimate a high-precision three-dimensional earth surface deformation field.

WO 2020/233591 A1

[见续页]

ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

**(84) 指定国**(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护)：ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

**根据细则4.17的声明**：
- 关于发明人身份(细则4.17(i))
- 关于申请人有权申请并被授予专利(细则4.17(ii))
- 关于申请人有权要求在先申请的优先权(细则4.17(iii))

**本国际公布**：
- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

**(57) 摘要**：一种面向三维地表形变估计的InSAR和GNSS定权方法，包括：步骤1：利用待监测区域升轨和降轨InSAR数据，以及待监测区域的GNSS数据，基于地表应力应变模型及观测值成像几何建立未知点三维形变$d^0$与周围点一定数量的InSAR/GNSS数据$L_i$之间的函数关系；步骤2：对升轨和降轨InSAR和GNSS观测值$L_i$内部的$K_i$个观测数据进行相对定权，确定InSAR/GNSS各类观测值的初始权重矩阵$W_i$；步骤3：利用方差分量估计确定InSAR/GNSS各类观测值之间的精确权重矩阵式（I），基于最小二乘准则求解高精度的三维地表形变$d^0$；步骤4：对每一个地表点经过上述步骤1-3实现InSAR和GNSS融合估计高精度三维地表形变场。

# 一种面向三维地表形变估计的 InSAR 和 GNSS 定权方法

## 技术领域

本发明涉及遥感影像的大地测量领域，尤其涉及一种面向三维地表形变估计的 InSAR 和 GNSS 定权方法。

## 背景技术

合成孔径雷达干涉测量（Interferometric Synthetic Aperture Radar, SAR, InSAR）和全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）已经被广泛用于获取地震、火山、地下开采等引起的地表形变。InSAR 技术对同一区域不同时间（间隔为几天至几百天）的两景 SAR 影像进行处理即可得到地表某分辨单元（几米至几十米）在该时间间隔内沿雷达视线向的一维平均形变结果，其观测精度一般在毫米级或厘米级。GNSS 技术则是通过地面接收机获取时间连续的三维坐标序列，对两个时刻的坐标作差，即可获取接收机处的三维地表形变，其水平方向精度可达亚毫米级，垂直向精度可达毫米级。由此可见，InSAR 和 GNSS 技术在地表形变监测方面优势互补，为获取高精度、高空间分辨率的三维地表形变提供了新视角。

由于 InSAR 和 GNSS 的形变观测精度及观测目标特点的差异性，准确确定两类观测值之间的权重比例对于获取高精度三维地表形变结果至关重要。事实上，InSAR 和 GNSS 获取地表形变时极易受各种不确定因素影响，例如电离层，大气水汽，地表植被覆盖等，导致难以准确估计各类观测值的先验方差信息。目前，GNSS 的先验方差主要根据 GNSS 网平差获得，而 InSAR 数据的先验方差，则是假定远场区域没有形变，将半变异方差函数的拟合结果作为整个 InSAR 影像的先验方差，进而即可实现二者之间定权。但是，InSAR 观测误差在空间上往往是有差异的，因此其定权精度有限。另外，通过 InSAR 观测精度与相干性的经验公式，也可获取观测值的先验方差估值，但该方法难以反映观测值中大气等长波误差的影响。

## 发明内容

本发明旨在至少解决现有技术中存在的技术问题之一。为此，本发明公开了一种面向三维地表形变估计的 InSAR 和 GNSS 定权方法，包括以下步骤：

步骤 1：利用待监测区域升轨和降轨 InSAR 数据，以及所述待监测区域的 GNSS 数据，基于地表应力应变模型及观测值成像几何建立未知点三维形变$d^0$与周围点一定数量的 InSAR/GNSS 数据$L_i$之间的函数关系；

步骤 2：对升轨和降轨 InSAR 和 GNSS 等观测值$L_i$内部的$K_i$个观测数据进行相对定权，确定 InSAR/GNSS 各类观测值的初始权重矩阵$W_i$；

步骤 3：利用方差分量估计确定 InSAR/GNSS 各类观测值之间的精确权重矩阵$\widehat{W}_i$，基于最小二乘准则求解高精度的所述三维地表形变$d^0$；

步骤 4：对每一个地表点经过上述步骤 1-3 实现 InSAR 和 GNSS 融合估计高精度三维地表形变场。

更进一步地，所述步骤 1 进一步包括，所述未知点三维形变$d^0$与周围点一定数量的 InSAR/GNSS 数据$L_i$之间函数关系为：

$$L_i^k = B_i^k \cdot l$$

其中，$B_i^k = B_{geo,i}^k \cdot B_{sm}^k$；$P^0$表示未知点，$B_{sm}^k$为地表应力应变模型系数矩阵，$B_{geo,i}^k = \begin{cases} [a_i^k \quad b_i^k \quad c_i^k], & i = 1,2 \\ I, & i = 3 \end{cases}$，$I$为$3 \times 3$的单位矩阵，$l$代表$P^0$点处的未知参数向量，$L_i^k$为 InSAR/GNSS 数据，且$i = 1,2,3$，$L_1^k$，$L_2^k$代表的升轨 InSAR、降轨 InSAR 数据均是一个数值，$L_3^k$代表的 GNSS 数据是一个$3 \times 1$的向量。

更进一步地，所述步骤 2 进一步包括：所述地表应力应变模型为地表临近点三维地表形变之间的物理力学关系描述；所述观测值成像几何是 InSAR/GNSS 观测值与三维地表形变之间的几何关系描述。

确定$P^k$处的 InSAR/GNSS 观测值的初始权重：

$$W_i^k = \begin{cases} exp\left(-\frac{(D^k)^2}{(D_0)^2}\right), & i = 1,2 \\ exp\left(-\frac{(D^k)^2}{(D_0)^2}\right) \cdot [1,1,0.5]^T, & i = 3 \end{cases}$$

其中，$W_i^k$表示$P^k$处的初始权重，$D^k = \sqrt{(\Delta\, x^{e(k)})^2 + (\Delta\, x^{n(k)})^2 + (\Delta\, x^{u(k)})^2}$代表$P^k$与$P^0$之间的距离，$D_0$代表反距离定权衰减因子；

确定各类观测值的初始权重矩阵：

$$W_i = diag(W_i{}')$$

其中，$W_i^{'}=\left[(W_i^1)^T,(W_i^2)^T,\ldots,\left(W_i^{K_i}\right)^T\right]^T$，$W_i=diag\left(W_i^{'}\right)$表示对角线元素依次是向量$W_i^{'}$中元素的对角矩阵。

更进一步地，所述反距离定权衰减因子$D_0$通过下式确定：

$$D_0=\frac{1}{K^{'}K_3^{'}}\sum_{k^{'}=1}^{K^{'}}\sum_{k_3^{'}=1}^{K_3^{'}}D^{k^{'}k_3^{'}}$$

其中，$K^{'}$代表整个形变场中所有 GNSS 站点的个数，$K_3^{'}$代表距离$P^0$最近的 GNSS 站点的个数，$K_3^{'}$取值 4-6，$D^{k^{'}k_3^{'}}$代表所有$K^{'}$个 GNSS 站点中的第$k^{'}$个站点与距离$P^0$最近的$K_3^{'}$个 GNSS 站点中的第$k_3^{'}$个站点之间的距离。

更进一步地，所述步骤 3 进一步包括，

利用方差分量估计确定 InSAR/GNSS 各类观测值之间的精确权重矩阵$\widehat{W}_i$及其单位权中误差$\sigma_i^2$，基于最小二乘准则求解高精度三维地表形变$d^0$；

令$M_i=B_i^TW_iB_i,N_i=B_i^TW_iL_i,M=\sum_{i=1}^3M_i,N=\sum_{i=1}^3N_i$，可得：

$$l=M^{-1}N \tag{10}$$

进而根据方差分量估计算法可得：

$$\sigma^2=\Psi^{-1}\delta \tag{11}$$

其中，

$\sigma^2=[\sigma_1^2\quad\sigma_2^2\quad\sigma_3^2]^T$为各类观测值的单位权中误差估值；Ψ 为转换矩阵，δ 为观测值改正数二次型向量；

通过式（13）对各类观测值权重$W_i$进行更新：

$$\widehat{W}_1=W_1,\widehat{W}_2=\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2W_2^{-1}},\widehat{W}_3=\frac{\sigma_1^2}{\sigma_3^2W_3^{-1}} \tag{13}$$

利用式（13）更新观测值权重矩阵，重新计算式（10）（11），迭代此过程直至各类观测值单位权中误差满足$\sigma_i^2$之间差别小于阈值Δσ 。

再根据式（10）得到高精度三维地表形变结果，即未知参数向量$l$的第 1、2、3 个元素。

更进一步地，所述转换矩阵Ψ 为：

$$\Psi=\begin{bmatrix}K_1-2tr(M^{-1}M_1)+tr(M^{-1}M_1)^2 & tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_2) & tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_3)\\ tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_2) & K_2-2tr(M^{-1}M_2)+tr(M^{-1}M_2)^2 & tr(M^{-1}M_2M^{-1}M_3)\\ tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_3) & tr(M^{-1}M_2M^{-1}M_3) & K_3-2tr(M^{-1}M_3)+tr(M^{-1}M_3)^2\end{bmatrix}$$

更进一步地，所述观测值改正数二次型向量δ 为：

$$\delta = [v_1^T W_1 v_1 \quad v_2^T W_2 v_2 \quad v_3^T W_3 v_3]^T$$

其中，观测值改正数$v_i = B_i \cdot l - L_i$。

更进一步地，所述迭代此过程直至各类观测值单位权中误差满足$\sigma_i^2$之间差别小于阈值Δσ 进一步包括：所述阈值$\Delta\sigma^2 = 1\text{mm}^2$。

本发明与现有技术相比，取得的有益效果为：本发明提出了一种面向三维地表形变估计的 InSAR 和 GNSS 定权方法，该方法在 InSAR 和 GNSS 融合估计三维地表形变时，基于地表应力应变模型建立 InSAR/GNSS 观测值与未知点三维地表形变之间的函数关系，同时利用方差分量估计算法准确确定 InSAR 和 GNSS 两类观测值之间的权重比例，最后基于最小二乘准则，实现三维地表形变的高精度估计。而传统方法中需要大量时序上的 InSAR/GNSS 数据为方差分量估计定权提供多余观测，因此对于瞬时形变（如火山、地震等）并不适用。本发明内容则是利用地表应力应变模型在空间上提供多余观测，使得方差分量估计可在缺乏时序数据的同时也可以获取精确的 InSAR/GNSS 权重比例，进而有效提高了 InSAR 和 GNSS 融合估计三维地表形变的精度及普适性。

**附图说明**

从以下结合附图的描述可以进一步理解本发明。图中的部件不一定按比例绘制，而是将重点放在示出实施例的原理上。在图中，在不同的视图中，相同的附图标记指定对应的部分。

图 1 是本发明一种基于方差分量估计的 InSAR 和 GNSS 融合估计三维地表形变方法的流程图；

图 2 是本发明方法与传统方法得到的三维地表形变场与原始模拟三维地表形变场的对比图；

图 3 是本发明一实施例中的升轨和降轨 InSAR 模拟形变数据图。

**具体实施方式**

为了使本技术相关领域的人员能够更好地理解本发明，下面将对本发明的实施方案进行清楚、详细的描述。同时，在此对本发明中主要的公式符号进行说明如下：

*P*：点

*x*：点的坐标

*d*：三维地表形变

$l$：未知参数向量

$B$：系数矩阵

$L$：InSAR/GNSS 观测值

$W$：InSAR/GNSS 观测值权重

$\sigma$：InSAR/GNSS 观测值单位权中误差

$K$：InSAR/GNSS 观测值个数

$D$：两点间距离

$V$：方差

上标 $0/k$：点的索引编号

下标 $i/1/2/3$：InSAR/GNSS 观测值类型索引编号

上标 $enu$：与观测值相关的东西向（east-west）、南北向（north-south）及垂直向（up-down）变量

下标 $enu$：与未知参数相关的东西向（east-west）、南北向（north-south）及垂直向（up-down）变量

实施例一

如图 1 所示，本实施例具体实施方式如下：

步骤 1：利用待监测区域的升轨和降轨 InSAR 数据，以及该区域的 GNSS 数据，基于地表应力应变模型（Strain Model，SM）建立未知点三维地表形变与该点周围一定数量的 InSAR/GNSS 数据之间的函数关系；

如何确定用于建立函数关系 InSAR/GNSS 数据的数量将在步骤 2 中介绍。

假设未知点$P^0$的三维坐标和三维形变分别为$x^0 = [x_e^0 \quad x_n^0 \quad x_u^0]^T$，$d^0 = [d_e^0 \quad d_n^0 \quad d_u^0]^T$，周围一点$P^k$的三维坐标和三维形变分别为$x^k = [x_e^k \quad x_n^k \quad x_u^k]^T$，$d^k = [d_e^k \quad d_n^k \quad d_u^k]^T$，那么根据地表应力应变模型有下式：

$$d^k = H \cdot \Delta^k + d^0 \tag{1}$$

其中$\Delta^k = x^k - x^0 = [\Delta x_e^k \quad \Delta x_n^k \quad \Delta x_u^k]^T$。$H$代表应力应变模型未知参数矩阵，可表示为：

$$H=\begin{bmatrix}\xi_{ee} & \xi_{en} & \xi_{eu}\\ \xi_{en} & \xi_{nn} & \xi_{nu}\\ \xi_{eu} & \xi_{nu} & \xi_{uu}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0 & -\omega_{en} & \omega_{eu}\\ \omega_{en} & 0 & -\omega_{nu}\\ -\omega_{eu} & \omega_{nu} & 0\end{bmatrix} \tag{2}$$

$\xi$和$\omega$代表地表应力应变模型中的应变参数和旋转参数。

进而，可将式（1）写成：

$$d^k=B_{sm}^k\cdot l \tag{3}$$

其中，

$B_{sm}^k=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & \Delta x_e^k & \Delta x_n^k & \Delta x_u^k & 0 & 0 & 0 & -\Delta x_n^k & \Delta x_u^k & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_e^k & 0 & \Delta x_n^k & \Delta x_u^k & 0 & \Delta x_e^k & 0 & -\Delta x_u^k\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_e^k & 0 & \Delta x_n^k & \Delta x_u^k & 0 & -\Delta x_e^k & \Delta x_n^k\end{bmatrix}$，代表地表应力应变模型系数矩阵。

$l=[d_e^0 \quad d_n^0 \quad d_u^0 \quad \xi_{ee} \quad \xi_{en} \quad \xi_{eu} \quad \xi_{nn} \quad \xi_{nu} \quad \xi_{uu} \quad \omega_{en} \quad \omega_{eu} \quad \omega_{nu}]^T$，代表$P^0$点处的未知参数向量。

进一步，假设在$P^k$处有升轨 InSAR、降轨 InSAR 和 GNSS 三种数据的一种或多种，分别记为$L_1^k, L_2^k, L_3^k$，其中$L_1^k$，$L_2^k$代表的升轨 InSAR、降轨 InSAR 数据均是一个数值，而$L_3^k$代表的 GNSS 数据是一个$3\times 1$的向量，即$L_3^k=\left[L_3^{e(k)} \quad L_3^{n(k)} \quad L_3^{u(k)}\right]^T$。考虑 InSAR 和 GNSS 观测值与三维地表形变之间的几何关系，可建立$L_i^k(i=1,2,3)$与点$P^k$处三维地表形变$d^k$之间的函数关系：

$$L_i^k=B_{geo,i}^k\cdot d^k \tag{4}$$

其中，

$B_{geo,i}^k=\begin{cases}[a_i^k \quad b_i^k \quad c_i^k], & i=1,2\\ I, & i=3\end{cases}$，$I$为$3\times 3$的单位矩阵，

$$\begin{cases}a_i^k=s_i\cdot\sin(\theta_i^k)\sin\left(\alpha_i^k-\frac{3\pi}{2}\right)\\ b_i^k=s_i\cdot\sin(\theta_i^k)\cos\left(\alpha_i^k-\frac{3\pi}{2}\right)\\ c_i^k=\cos(\theta_i^k)\end{cases},\ s_i=\begin{cases}1, & InSAR\text{为左视数据}\\ -1, & InSAR\text{为右视数据}\end{cases}$$

$\alpha_i^k$，$\theta_i^k$分别代表获取 InSAR 数据时卫星的方位角和入射角。

综合式（3）和（4），可得：

$$L_i^k=B_i^k\cdot l \tag{5}$$

其中，$B_i^k=B_{geo,i}^k\cdot B_{sm}^k$。

至此，即可建立周围点$P^k$处的 InSAR/GNSS 观测值与$P^0$点处的未知参数向量$l$之间的函数关系。

假设点$P^0$周围有$K_1$个升轨 InSAR、$K_2$个降轨 InSAR 和$K_3$个 GNSS 站点可用于估计未知参数向量$l$，则最终可得：

$$L = B \cdot l \tag{6}$$

其中，

$L = [(L_1)^T, (L_2)^T, (L_3)^T]^T$，$L_i = \left[(L_i^1)^T, (L_i^2)^T, \ldots, \left(L_i^{K_i}\right)^T\right]^T$，

$B = [(B_1)^T, (B_2)^T, (B_3)^T]^T$，$B_i = \left[(B_i^1)^T, (B_i^2)^T, \ldots, \left(B_i^{K_i}\right)^T\right]^T$。

步骤 2：对各类观测值内部的$K_i$个观测数据进行相对定权，即确定各类观测值的初始权重矩阵$W_i$；

由于 GNSS 站点分布较为稀疏，与$P^0$不同距离的 GNSS 站点数据应赋予不同的权重。本发明利用下式来确定$P^k$处的 InSAR/GNSS 观测值的初始权重：

$$W_i^k = \begin{cases} exp\left(-\dfrac{(D^k)^2}{(D_0)^2}\right), & i = 1,2 \\ exp\left(-\dfrac{(D^k)^2}{(D_0)^2}\right) \cdot [1,1,0.5]^T, & i = 3 \end{cases} \tag{7}$$

其中，$D^k = \sqrt{(\Delta x^{e(k)})^2 + (\Delta x^{n(k)})^2 + (\Delta x^{u(k)})^2}$代表$P^k$与$P^0$之间的距离，$D_0$代表反距离定权衰减因子，可通过下式确定：

$$D_0 = \frac{1}{K' K_3'} \sum_{k'=1}^{K'} \sum_{k_3'=1}^{K_3'} D^{k' k_3'} \tag{8}$$

$K'$代表整个形变场中所有 GNSS 站点的个数。$K_3'$代表距离$P^0$最近的 GNSS 站点的个数，根据经验一般取 4-6。$D^{k' k_3'}$代表所有$K'$个 GNSS 站点中的第$k'$个站点与距离$P^0$最近的$K_3'$个 GNSS 站点中的第$k_3'$个站点之间的距离。

值得注意的是，GNSS 垂直向的观测精度往往比水平向精度低，因此式（7）中 GNSS 垂直向观测值的权重比例系数为 0.5，具体实施过程中可根据 GNSS 三个维度形变值的先验方差信息调整此比例参数。

此时，即可确定各类观测值的初始权重矩阵：

$$W_i = diag(W_i') \tag{9}$$

其中，$W_i' = \left[(W_i^1)^T, (W_i^2)^T, \ldots, \left(W_i^{K_i}\right)^T\right]^T$，$W_i = diag(W_i')$表示对角线元素依次是向量$W_i'$中元素的对角矩阵。

同时，当一组数据中最小权重与最大权重之比小于一定阈值时，最小权重对应的观测值在未知参数解算过程中所起到的作用可以忽略不计。因此，当本发明方法在解算过程中不考虑初始权重$exp\left(-\frac{(D^k)^2}{(D_0)^2}\right)$小于阈值$W_{thr}$的 GNSS 站点。其中，$W_{thr}$根据经验一般取$10^{-6}$。

此时，即可确定参与步骤一中用于建立函数关系 GNSS 站点的数量$K_3$。为了使得方差分量估计可以更加准确的确定权重，各类观测值个数应当大致相等，即在本发明中应满足$K_1 \approx K_2 \approx 3K_3$。基于此，本发明中选取距$P^0$最近的$K_1/K_2$个升轨/降轨的 InSAR 数据参与未知参数向量$l$的解算。

步骤 3：利用方差分量估计确定 InSAR/GNSS 各类观测值之间的精确权重矩阵$\widehat{W}_i$及其单位权中误差$\sigma_i^2$，基于最小二乘准则求解高精度三维地表形变$d^0$；

令$M_i = B_i^T W_i B_i, N_i = B_i^T W_i L_i, M = \sum_{i=1}^{3} M_i, N = \sum_{i=1}^{3} N_i$，可得：

$$l = M^{-1}N \tag{10}$$

进而根据方差分量估计算法可得：

$$\sigma^2 = \Psi^{-1}\delta \tag{11}$$

其中，

$\sigma^2 = [\sigma_1^2 \quad \sigma_2^2 \quad \sigma_3^2]^T$代表各类观测值的单位权中误差估值。

$\Psi =$

$$\begin{bmatrix} K_1 - 2tr(M^{-1}M_1) + tr(M^{-1}M_1)^2 & tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_2) & tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_3) \\ tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_2) & K_2 - 2tr(M^{-1}M_2) + tr(M^{-1}M_2)^2 & tr(M^{-1}M_2M^{-1}M_3) \\ tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_3) & tr(M^{-1}M_2M^{-1}M_3) & K_3 - 2tr(M^{-1}M_3) + tr(M^{-1}M_3)^2 \end{bmatrix}$$

代表转换矩阵。

$\delta = [v_1^T W_1 v_1 \quad v_2^T W_2 v_2 \quad v_3^T W_3 v_3]^T$代表观测值改正数二次型向量。

$v_i = B_i \cdot l - L_i$代表观测值改正数。

根据方差分量估计算法可得，当各类观测值单位权中误差近似相等时，即

$$\sigma_1^2 \approx \sigma_2^2 \approx \sigma_3^2 \tag{12}$$

此时的观测值权重矩阵为最优权阵。由于初始权重矩阵$W_i$只考虑了同一类观测值内部各个观测数据之间的相对权重，并未考虑不同类观测值之间的权重比例，因此式（11）得到的各类观测值单位权中误差往往并不满足式（12）。本发明结合方差分量估计思路，利用下式对各类观测值权重$W_i$进行更新：

$$\widehat{W}_1 = W_1, \widehat{W}_2 = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2 W_2^{-1}}, \widehat{W}_3 = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_3^2 W_3^{-1}} \quad (13)$$

利用式（13）更新观测值权重矩阵，重新计算式（10）（11），迭代此过程直至各类观测值单位权中误差满足式（12），即$\sigma_i^2$之间差别小于阈值$\Delta\sigma$，本发明中$\Delta\sigma^2 = 1\text{mm}^2$。

此时，根据式（10）即可得到高精度三维地表形变结果，即未知参数向量$l$的第1,2,3个元素。

对每一个地表点经过上述步骤1-3即可实现InSAR和GNSS融合估计高精度三维地表形变场。

实施例二

本实施通过实验对本发明进行验证，如图2-3所示，其中，图2（a）-（c）依次为原始模拟的东西向、南北向和垂直向形变数据，图2（d）-（f）依次为传统方法得到的东西向、南北向和垂直向的形变数据，图2（g）-（i）依次为本发明方法得到的东西向、南北向和垂直向的形变数据（单位：厘米）；图3（a）为升轨InSAR数据，图3（b）为降轨InSAR数据，图中三角形代表GNSS站点的位置分布（单位：厘米）。

模拟数据描述：①在一定区域（图像大小400×450）模拟东西向、南北向及垂直向的三维形变场（如图2（a）-（c））；②结合哨兵-1A/B卫星数据的成像几何，计算升轨和降轨InSAR形变结果，其中升轨数据的入射角和方位角分别为39.3。,-12.2。，降轨数据的入射角和方位角分别为33.9。,-167.8。；③在升轨和降轨InSAR数据中分别加人方差为4mm和6mm的高斯噪声，同时在两景InSAR数据中也加入了一定量级的大气延迟误差，得到的总误差均方根分别为4.9mm和6.9mm。此时即可得到用于模拟实验的InSAR原始数据（如图3所示）。④同时，在形变场中随机选取了100个像素，作为GNSS观测站点的位置，其相应位置上原始模拟的三维形变作为GNSS观测值，同时在GNSS水平形变观测值加入方差为1mm的高斯噪声，在GNSS垂直形变观测值加入方差为2mm的高斯噪声。其GNSS站点的分布如图3中的三角形所示。

传统融合InSAR和GNSS估计三维地表形变场时，利用反距离加权的方式对GNSS先验方差进行放大，利用InSAR远场数据进行半变异函数拟合求解远场区域InSAR观测值的先验方差，并将其作为整个InSAR影像的先验方差。然后在求解过程中，利用InSAR和GNSS观测值的先验方差进行定权，在最小二乘准则下求解三维地表形变。本

次模拟实验分别利用传统方法（图 2（d）-（f））和本发明方法（图 2（g）-（i））对模拟数据进行三维地表形变场的解算，两种方法求解的三维地表形变场的均方根误差如表 1 所示。

表 1 三维地表形变场残差均方根误差

| 方法 | 东西向（mm） | 南北向（mm） | 垂直向（mm） |
|---|---|---|---|
| 传统方法 | 3.1 | 2.1 | 2.7 |
| 本发明方法 | 1.8 | 2.0 | 2.2 |

综合表 1,图 3 可知，本发明提及的算法相比于传统算法可得到更为精确的三维地表形变场。

以上应用了具体个例对本发明进行阐述，只是为了帮助本领域中的普通技术人员很好的理解。在不偏离本发明的精神和范围的情况下，还可以对本发明的具体实施方式作各种推演、变形和替换。这些变更和替换都将落在本发明权利要求书所限定的范围内。

还需要说明的是，术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含，从而使得包括一系列要素的过程、方法、商品或者设备不仅包括那些要素，而且还包括没有明确列出的其他要素，或者是还包括为这种过程、方法、商品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下，由语句“包括一个……”限定的要素，并不排除在包括所述要素的过程、方法、商品或者设备中还存在另外的相同要素。

本领域技术人员应明白，本申请的实施例可提供为方法、系统或计算机程序产品。因此，本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且，本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

虽然上面已经参考各种实施例描述了本发明，但是应当理解，在不脱离本发明的范围的情况下，可以进行许多改变和修改。因此，其旨在上述详细描述被认为是例示性的而非限制性的，并且应当理解，以下权利要求(包括所有等同物)旨在限定本发明的精神和范围。以上这些实施例应理解为仅用于说明本发明而不用于限制本发明的保护范围。在阅读了本发明的记载的内容之后，技术人员可以对本发明作各种改动或修改，这些等效变化和修饰同样落入本发明权利要求所限定的范围。

1. 一种面向三维地表形变估计的 InSAR 和 GNSS 定权方法，其特征在于，包括以下步骤：

步骤 1：利用待监测区域升轨和降轨 InSAR 数据，以及所述待监测区域的 GNSS 数据，基于地表应力应变模型及观测值成像几何建立未知点三维形变$d^0$与周围点一定数量的 InSAR/GNSS 数据$L_i$之间的函数关系；

步骤 2：对升轨和降轨 InSAR 和 GNSS 等观测值$L_i$内部的$K_i$个观测数据进行相对定权，确定 InSAR/GNSS 各类观测值的初始权重矩阵$W_i$；

步骤 3：利用方差分量估计确定 InSAR/GNSS 各类观测值之间的精确权重矩阵$\widehat{W}_i$，基于最小二乘准则求解高精度的所述三维地表形变$d^0$；

步骤 4：对每一个地表点经过上述步骤 1-3 实现 InSAR 和 GNSS 融合估计高精度三维地表形变场。

2. 如权利要求 1 所述的一种的方法，其特征在于，所述步骤 1 进一步包括，所述未知点三维形变$d^0$与周围点一定数量的 InSAR/GNSS 数据$L_i$之间函数关系为：

$$L_i^k = B_i^k \cdot l$$

其中，$B_i^k = B_{geo,i}^k \cdot B_{sm}^k$；$P^0$表示未知点，$B_{sm}^k$为地表应力应变模型系数矩阵，$B_{geo,i}^k = \begin{cases} [a_i^k \quad b_i^k \quad c_i^k], & i = 1,2 \\ I, & i = 3 \end{cases}$，$I$为$3 \times 3$的单位矩阵，$l$代表$P^0$点处的未知参数向量，$L_i^k$为 InSAR/GNSS 数据，且$i = 1,2,3$，$L_1^k$，$L_2^k$代表的升轨 InSAR、降轨 InSAR 数据均是一个数值，$L_3^k$代表的 GNSS 数据是一个$3 \times 1$的向量。

3. 如权利要求 2 所述的一种的方法，其特征在于，所述步骤 2 进一步包括：所述地表应力应变模型为地表临近点三维地表形变之间的物理力学关系描述；所述观测值成像几何是 InSAR/GNSS 观测值与三维地表形变之间的几何关系描述，

确定$P^k$处的 InSAR/GNSS 观测值的初始权重：

$$W_i^k = \begin{cases} exp\left(-\frac{(D^k)^2}{(D_0)^2}\right), & i = 1,2 \\ exp\left(-\frac{(D^k)^2}{(D_0)^2}\right) \cdot [1,1,0.5]^T, & i = 3 \end{cases}$$

其中，$W_i^k$表示$P^k$处的初始权重，$D^k = \sqrt{(\Delta\ x^{e(k)})^2 + (\Delta\ x^{n(k)})^2 + (\Delta\ x^{u(k)})^2}$代表$P^k$与$P^0$之间的距离，$D_0$代表反距离定权衰减因子；

确定各类观测值的初始权重矩阵：

$$W_i = diag(W_i^{'})$$

其中，$W_i^{'} = \left[(W_i^1)^T,(W_i^2)^T,\ldots,(W_i^{K_i})^T\right]^T$，$W_i = diag(W_i^{'})$表示对角线元素依次是向量$W_i^{'}$中元素的对角矩阵。

4. 如权利要求 3 所述的一种的方法，其特征在于，所述反距离定权衰减因子$D_0$通过下式确定：

$$D_0 = \frac{1}{K^{'}K_3^{'}}\sum_{k^{'}=1}^{K^{'}}\sum_{k_3^{'}=1}^{K_3^{'}} D^{k^{'}k_3^{'}}$$

其中，$K^{'}$代表整个形变场中所有 GNSS 站点的个数，$K_3^{'}$代表距离$P^0$最近的 GNSS 站点的个数，$K_3^{'}$取值 4-6，$D^{k^{'}k_3^{'}}$代表所有$K^{'}$个 GNSS 站点中的第$k^{'}$个站点与距离$P^0$最近的$K_3^{'}$个 GNSS 站点中的第$k_3^{'}$个站点之间的距离。

5. 如权利要求 4 所述的一种的方法，其特征在于，所述 3 进一步包括，

利用方差分量估计确定 InSAR/GNSS 各类观测值之间的精确权重矩阵$\widehat{W}_i$及其单位权中误差$\sigma_i^2$，基于最小二乘准则求解高精度三维地表形变$d^0$；

令$M_i = B_i^T W_i B_i, N_i = B_i^T W_i L_i, M = \sum_{i=1}^{3} M_i, N = \sum_{i=1}^{3} N_i$，可得：

$$l = M^{-1}N \tag{10}$$

进而根据方差分量估计算法可得：

$$\sigma^2 = \Psi^{-1}\delta \tag{11}$$

其中，

$\sigma^2 = [\sigma_1^2 \quad \sigma_2^2 \quad \sigma_3^2]^T$为各类观测值的单位权中误差估值；$\Psi$为转换矩阵，$\delta$ 为观测值改正数二次型向量；

通过式（13）对各类观测值权重$W_i$进行更新：

$$\widehat{W}_1 = W_1, \widehat{W}_2 = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2 W_2^{-1}}, \widehat{W}_3 = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_3^2 W_3^{-1}} \tag{13}$$

利用式（13）更新观测值权重矩阵，重新计算式（10）（11），迭代此过程直至各类观测值单位权中误差满足$\sigma_i^2$之间差别小于阈值$\Delta\sigma$；

再根据式（10）得到高精度三维地表形变结果，即未知参数向量$l$的第 1、2、3 个元素。

6. 如权利要求 5 所述的一种的方法，其特征在于，所述转换矩阵$\Psi$为：

$$\Psi = \begin{bmatrix} K_1 - 2tr(M^{-1}M_1) + tr(M^{-1}M_1)^2 & tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_2) & tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_3) \\ tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_2) & K_2 - 2tr(M^{-1}M_2) + tr(M^{-1}M_2)^2 & tr(M^{-1}M_2M^{-1}M_3) \\ tr(M^{-1}M_1M^{-1}M_3) & tr(M^{-1}M_2M^{-1}M_3) & K_3 - 2tr(M^{-1}M_3) + tr(M^{-1}M_3)^2 \end{bmatrix}$$

。

7. 如权利要求 6 所述的一种的方法，其特征在于，所述观测值改正数二次型向量 δ 为：

$$\delta = [v_1^T W_1 v_1 \quad v_2^T W_2 v_2 \quad v_3^T W_3 v_3]^T$$

其中，观测值改正数$v_i = B_i \cdot l - L_i$。

8. 如权利要求 7 所述的一种的方法，其特征在于，所述迭代此过程直至各类观测值单位权中误差满足$\sigma_i^2$之间差别小于阈值Δσ 进一步包括：阈值$\Delta\sigma^2 = 1\text{mm}^2$。

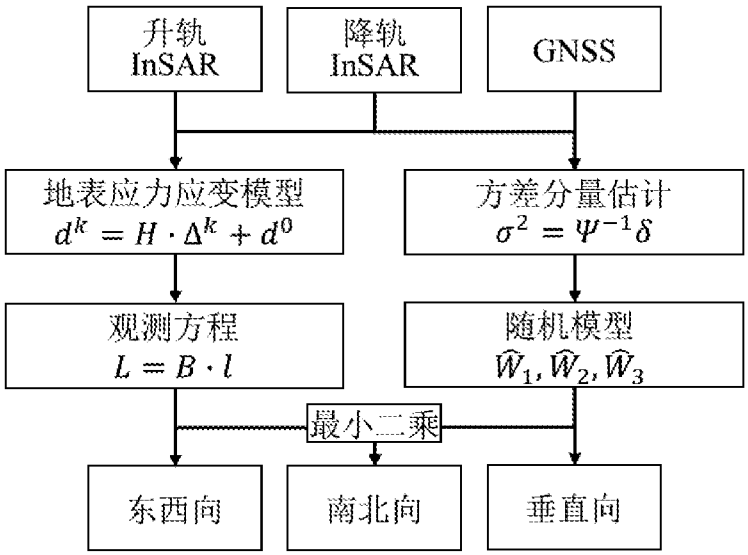
升轨
InSAR
降轨
InSAR
GNSS
地表应力应变模型
$d^k = H \cdot \Delta^k + d^0$
方差分量估计
$\sigma^2 = \Psi^{-1}\delta$
观测方程
$L = B \cdot l$
随机模型
$\widehat{W}_1, \widehat{W}_2, \widehat{W}_3$
最小二乘
东西向
南北向
垂直向

图 1

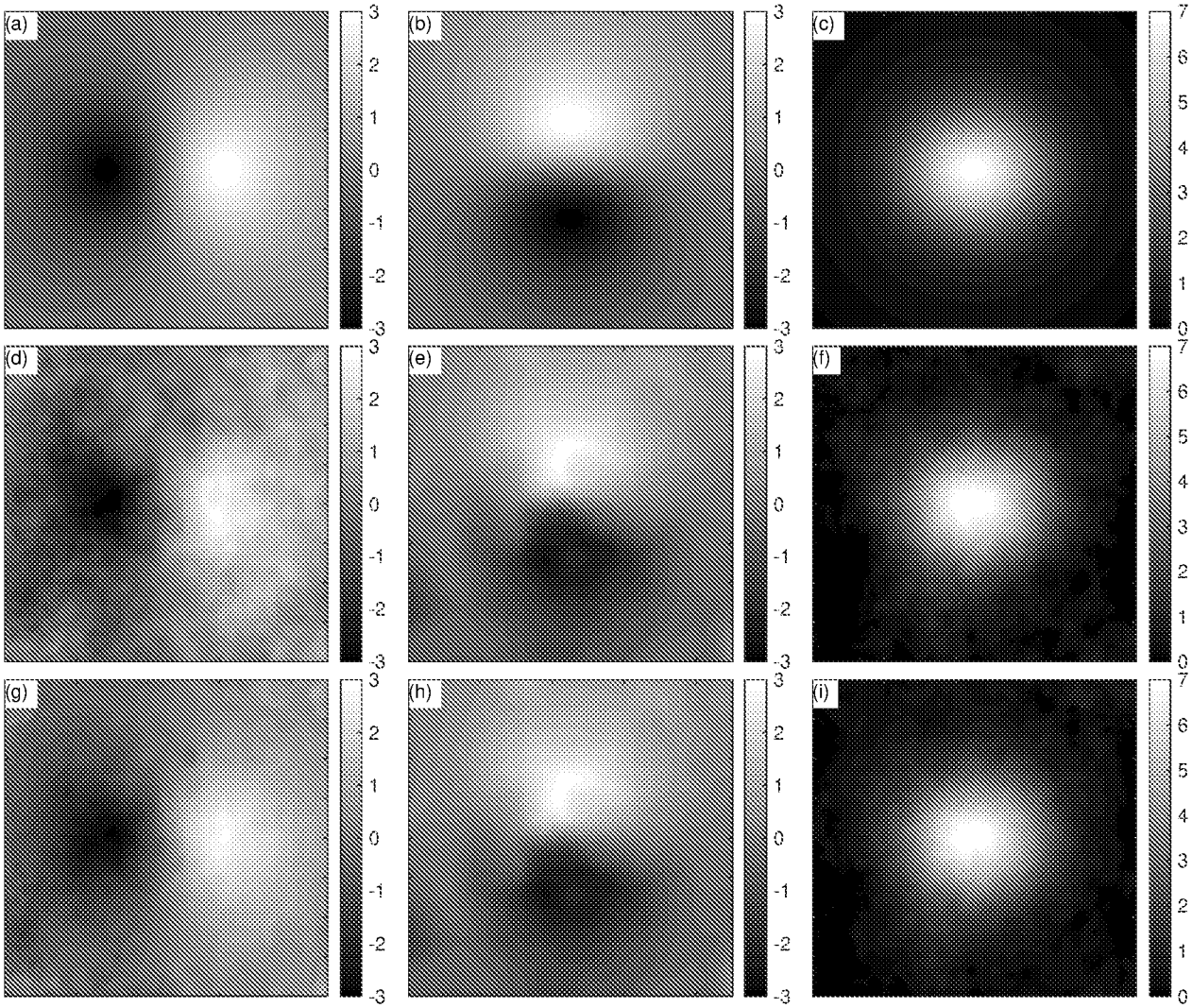


图 2

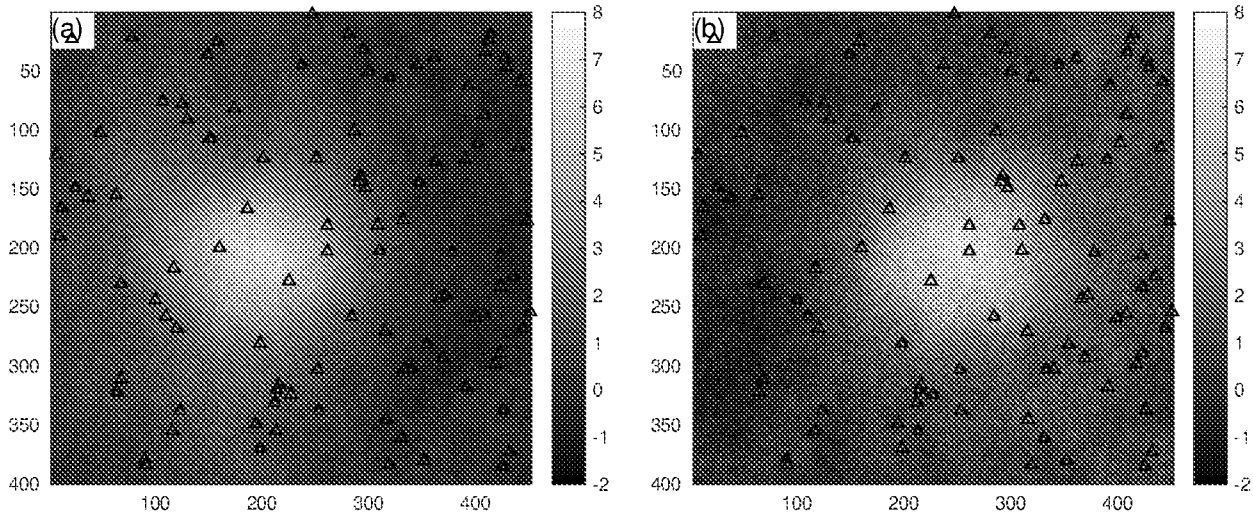


图 3

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
**PCT/CN2020/091273**

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01S 13/90(2006.01)i; G01B 15/06(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01S, G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT; CNKI; WPI; EPODOC: 三维, 3D, 地表, 形变, InSAR, GNSS, GPS, 北斗, 加权, 权重, 定权, 应力模型, 成像几何, 方差, 最小二乘, three-dimensional, surface, deformation, displacement, weight+, stain model, imaging geometry, variable, least w square

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| PX | CN 110058236 A (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) 26 July 2019 (2019-07-26)<br>description paragraphs [0062]-[0119], figure 1 | 1-8 |
| A | CN 107102332 A (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) 29 August 2017 (2017-08-29)<br>description paragraphs [0033]-[0077], figure 1 | 1-8 |
| A | CN 104699966 A (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) 10 June 2015 (2015-06-10)<br>entire document | 1-8 |
| A | US 2009237297 A1 (HALLIBURTON ENERGY SERVICES, INC. et al.) 24 September 2009 (2009-09-24)<br>entire document | 1-8 |
| A | LIU, Jihong et al. "A Method for Measuring 3-D Surface Deformations With InSAR Based on Strain Model and Variance Component Estimation"<br>*《IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING》*,<br>Vol. 56, No. 1,, 31 January 2018 (2018-01-31),<br>ISSN: 0196-2892,<br>pp. 239-250 | 1-8 |

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

| Date of the actual completion of the international search | Date of mailing of the international search report |
|---|---|
| **28 July 2020** | **19 August 2020** |
| Name and mailing address of the ISA/CN<br>**China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)**<br>**No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088**<br>**China**<br>Facsimile No. **(86-10)62019451** | Authorized officer<br><br>Telephone No. |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.
**PCT/CN2020/091273**

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| A | HU, Jun et al. "Three-Dimensional Surface Displacements From InSAR and GPS Measurements With Variance Component Estimation"<br>*《IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS》*,<br>Vol. 9, No. 4,, 31 July 2012 (2012-07-31),<br>ISSN: 1545-598X,<br>pp. 754-758 | 1-8 |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**
**Information on patent family members**

International application No.
**PCT/CN2020/091273**

| Patent document cited in search report | | | Publication date (day/month/year) | Patent family member(s) | | | Publication date (day/month/year) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CN | 110058236 | A | 26 July 2019 | None | | | |
| CN | 107102332 | A | 29 August 2017 | CN | 107102332 | B | 06 December 2019 |
| CN | 104699966 | A | 10 June 2015 | CN | 104699966 | B | 17 May 2017 |
| US | 2009237297 | A1 | 24 September 2009 | US | 7768441 | B2 | 03 August 2010 |
| | | | | CA | 2652639 | A1 | 06 August 2009 |
| | | | | CA | 2652639 | C | 08 January 2013 |

# 国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2020/091273

A. 主题的分类

G01S 13/90(2006.01)i; G01B 15/06(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01S, G01B

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNPAT; CNKI; WPI; EPODOC:三维，3D，地表，形变，InSAR，GNSS，GPS，北斗，加权,权重，定权，应力模型，成像几何，方差，最小二乘，three-dimensional，surface，deformation，displacement，weight+，stain model，imaging geometry，variable，least w square

C. 相关文件

| 类 型* | 引用文件，必要时，指明相关段落 | 相关的权利要求 |
|---|---|---|
| PX | CN 110058236 A (中南大学) 2019年 7月 26日 (2019-07-26)<br>说明书第[0062]-[0119]段、图1 | 1-8 |
| A | CN 107102332 A (中南大学) 2017年 8月 29日 (2017-08-29)<br>说明书第[0033]-[0077]段、图1 | 1-8 |
| A | CN 104699966 A (中南大学) 2015年 6月 10日 (2015-06-10)<br>全文 | 1-8 |
| A | US 2009237297 A1 (HALLIBURTON ENERGY SERVICES, INC. 等) 2009年 9月 24日 (2009-09-24)<br>全文 | 1-8 |
| A | LIU, Jihong 等. "A Method for Measuring 3-D Surface Deformations With InSAR Based on Strain Model and Variance Component Estimation"<br>《IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING》,<br>第56卷，第1期，2018年 1月 31日 (2018-01-31),<br>ISSN：0196-2892,<br>第239-250页 | 1-8 |

☑ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

| 国际检索实际完成的日期 | 国际检索报告邮寄日期 |
|---|---|
| 2020年 7月 28日 | 2020年 8月 19日 |

| ISA/CN的名称和邮寄地址 | 受权官员 |
|---|---|
| 中国国家知识产权局(ISA/CN)<br>中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 | 周璐璐 |
| 传真号 (86-10)62019451 | 电话号码 86-(10)-53962589 |

C. 相关文件

| 类 型* | 引用文件，必要时，指明相关段落 | 相关的权利要求 |
| --- | --- | --- |
| A | HU, Jun 等. "Three-Dimensional Surface Displacements From InSAR and GPS Measurements With Variance Component Estimation" 《IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS》, 第9卷, 第4期, 2012年 7月 31日 (2012-07-31), ISSN: 1545-598X, 第754-758页 | 1-8 |

# 国际检索报告
## 关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2020/091273

| 检索报告引用的专利文件 | | | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利 | | | 公布日<br>(年/月/日) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CN | 110058236 | A | 2019年 7月 26日 | 无 | | | |
| CN | 107102332 | A | 2017年 8月 29日 | CN | 107102332 | B | 2019年 12月 6日 |
| CN | 104699966 | A | 2015年 6月 10日 | CN | 104699966 | B | 2017年 5月 17日 |
| US | 2009237297 | A1 | 2009年 9月 24日 | US | 7768441 | B2 | 2010年 8月 3日 |
| | | | | CA | 2652639 | A1 | 2009年 8月 6日 |
| | | | | CA | 2652639 | C | 2013年 1月 8日 |