

基于 GNSS 观测网络的断层滑移时空反演

徐克科¹ 伍吉仓² 雷伟伟¹

1 河南理工大学测绘与国土信息工程学院,河南 焦作,454000

2 同济大学测绘与地理信息学院,上海,200092

摘要:利用 GNSS 网络位移时空序列,基于弹性位错理论,构建了断层滑移时空分布的动力卡尔曼滤波反演模型。考虑断层面的非均匀滑动,将断层面细分为多个子断层,获取了较精细的滑移空间分布,并顾及了先验信息和拉普拉斯平滑约束。鉴于断层滑移引起的地表形变具有高空间相关性的特点,利用整个 GNSS 观测网络数据一起参与反演,有效分离了空间不相关的噪声。实验结果表明,当断层形变位移量和噪声水平相当,且点位分布间隔沿走向和倾向至少与子断层长宽等同时,均能反演得到正确的断层滑移时空分布。若信噪比不变,测站分布密度继续增大时,对反演效果提高并不显著,但能够容忍较低信噪比的观测数据。

关键词:GNSS; 动态卡尔曼滤波; 断层滑移; 反演

中图法分类号:P228.41; P542 **文献标志码:**A

地震孕震过程是一个长期复杂的缓慢过程。而地震发生时断层破裂所释放的能量只是其中一部分,很大一部分能量在常规地震前或后,以断层无震蠕滑的形式释放。慢地震和无震蠕滑是伴随活动断层地震应力成核的重要过程,每一次断层蠕滑都可能会转移部分应力到其上部的锁定区域,使其应力承载在滑移时刻的增加大大高于平时的增加,地震危险性也会大大高于平时^[1-2]。因此,动态反演断层滑移时空分布特征及其演变过程,正确确定活动断层的初始应力场和边界条件以及判断断层锁定、蠕滑转换的周期性滑移过程,均对地震危险性评估至关重要。

连续运行的 GNSS 网络提供了时空采样分辨率越来越高的数据,在断层形变检测和反演方面显示出了巨大优势。Segall 最早提出了 GNSS 网滤波反演的思想^[3]。McGuire 研究了 GNSS 网络扩展滤波反演,并成功获取 1999 年加拿大 Cascadia 慢地震滑移分布^[4]。王武星和方颖等人对 GNSS 网滤波方法也给予了初步探讨,并进行了相应试验^[5-6]。Kositsky 等人提出了主成分反演方法,并获取了 2005 年 8.6 级 Nias 地震震后余滑分布^[7]。Radiguet 等人基于线性位错模型用

15 个 GPS 台站反演了 2006 年墨西哥慢地震滑移时空分布^[8]。陈光齐等人利用 GNSS 分析了震前应变积累及其时空特征和同震变形特征的差异^[9]。丁开华等人利用 GNSS 时序分析,采用单纯形法求得了汶川地震震后松弛时间约为 38 d,并基于粘弹性模型反演了流变学参数^[10]。目前,利用 GNSS 数据不仅仅局限于计算地壳平均运动速度和反演同震滑移、震间复位错等静态模式方面,诸多学者开始致力于震间和震后断层微动态形变异常检测和断层滑移动态反演等方面的研究^[11-12]。如何构建稳健的断层滑移时空分布反演模型,至少需要多大的信噪比和 GNSS 台站分布密度才能正确反演断层滑移时空分布等问题需要进一步研究和考证。

本文基于 OKADA 弹性位错理论,利用断层分布区域的 GNSS 网络时空序列,顾及先验信息和平滑约束,构建了 GNSS 网络卡尔曼滤波断层滑移时空反演模型。通过大量模拟实验,分析了不同信噪比和不同台站分布密度情况下的反演效果,得出了正确反演断层滑移时空分布所需要的最低信噪比和最优的台站分布密度。

1 卡尔曼滤波反演模型构建

1.1 观测方程

GNSS台站位移时间序列可表示为:

$$\begin{aligned} d_{\text{gnss}}(t) = & a_0 + bt + \sum_j^{n_k} g_j H(t - T_{gj}) + \\ & \sum_{f=1}^2 (a_f \sin(2\pi ft) + b_f \cos(2\pi ft)) + \quad (1) \\ & Gs + \delta_{\text{cme}} + \varepsilon_{\text{gnss}}, \quad \varepsilon_{\text{gnss}} \sim N(0, \sigma^2 \boldsymbol{\Sigma}_{\text{gnss}}) \end{aligned}$$

式中, t 为时间; a_0 为初始位置; b 为线性趋势项; 第三项为阶跃项, 用来修正地震或天线改变在时间序列所造成的落差, 可利用差分方法确定阶跃发生的时刻进行消除; 第四项为周年和半周年周期项; 第五项代表断层滑移所造成地表位移, 其中 G 表示 OKADA 弹性位错模型格林函数^[13]; s 为断层滑移量; δ_{cme} 为空间共模误差, 可结合 PCA (principal component analysis) 和 KLE (Karhunen-Loeve expansion) 方法去除^[14]; $\varepsilon_{\text{gnss}}$ 为观测误差, 为避免解算时某些误差未被模型化而导致误差低估, 需对其协方差阵 $\boldsymbol{\Sigma}_{\text{gnss}}$ 乘以一比例因子 σ^2 , 即变为 $\sigma^2 \boldsymbol{\Sigma}_{\text{gnss}}$ 。

1.2 约束条件

细分断层时, 未知数个数将远大于观测值个数。此时, 附加不同约束条件, 保持解的稳定至关重要。为避免滑动分布解的振荡, 避免相邻子断层滑动量在大小和方向上存在显著差异, 通常采用拉普拉斯平滑约束, 设置相邻断层间滑动量的梯度为最小^[15], 拉普拉斯二阶差分算子为:

$$\nabla_{s(i,j)}^2 = \frac{s(i,j-1) - 2s(i,j) + s(i,j+1)}{(\Delta x)^2} + \frac{s(i-1,j) - 2s(i,j) + s(i+1,j)}{(\Delta y)^2} \quad (2)$$

式中, $s(i,j)$ 表示位于第 i 行、第 j 列的子断层上的滑动量; $\Delta x, \Delta y$ 分别表示相邻子断层沿走向和倾向的距离。按式(2)分别对所有断层单元求相应的二阶差分算子, 观测方程的形式为:

$$d_n^V = H_n^V \cdot s + \varepsilon_V, \quad \varepsilon_V \sim N(0, \gamma^2 \mathbf{I}) \quad (3)$$

式中, 左边表示虚拟观测值, 一般假定为零; H_n^V 为所有子断层滑移拉普拉斯二阶差分算子; s 为所有子断层走向和倾向滑移大小; γ 为描述断层面上的滑移在空间上的平滑程度, 值越小越平滑, 反之滑移变化大; \mathbf{I} 为单位阵。

通常, 通过地球物理勘探可探知断层的某些先验信息, 如滑移速度、最大滑移量和滑移特征等, 可采用顾及被估参数的先验信息约束条件。

设 s_0 为待估参数 s 的先验值, ε_+ 为参数先验误差。观测方程的形式为:

$$s_0 = \mathbf{I} \cdot s + \varepsilon_+, \quad \varepsilon_+ \sim N(0, \beta \boldsymbol{\gamma}) \quad (4)$$

式中, β 用于制约断层滑移大小, 使滑移及滑移率始终控制在一定范围内变动。

1.3 状态模型

根据位置和速度系统噪声的谱密度矩阵^[16], 可以得到滑移和滑移率的状态方程, 其转移矩阵为:

$$\mathbf{T}_s = \begin{bmatrix} 1 & t_k - t_{k-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

过程噪声矩阵为:

$$\mathbf{Q}_s = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \alpha (t_k - t_{k-1})^3 & \frac{1}{2} \alpha (t_k - t_{k-1})^2 \\ \frac{1}{2} \alpha (t_k - t_{k-1})^2 & \alpha (t_k - t_{k-1}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, α 为速度谱密度, 用来控制滑移和滑移率在时间域的平滑程度。

在上述观测方程及卡尔曼滤波状态模型中, 共有 4 个超参数需要估计, 分别为 σ, γ, β 和 α , 可采用极大似然方法进行估计^[3]。因极大似然估计比较耗时, 本文把超参数转换至观测方程中, 利用扩展卡尔曼滤波方法随同模型参数一并求解^[4]。转换后, 观测方程(1)、(3)、(4)依次变为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sigma} d_{\text{gnss}}(t) = & \frac{1}{\sigma} G_{ij} \alpha s(t + \\ & \frac{1}{\sigma} \sum_{f=1}^2 (a_f \sin(2\pi ft) + b_f \cos(2\pi ft)) + \varepsilon_{\text{gnss}}, \\ & \varepsilon_{\text{gnss}} \sim N(0, \boldsymbol{\Sigma}_{\text{gnss}}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$d^V = 0 = \frac{1}{\gamma} H_n^V \alpha s + \varepsilon_V, \quad \varepsilon_V \sim N(0, \mathbf{I}) \quad (8)$$

$$d^+ = 0 = \frac{1}{\beta} \mathbf{I} \cdot \alpha s - s_0 + \varepsilon_+, \quad \varepsilon_+ \sim N(0, \mathbf{I}) \quad (9)$$

设第 k 历元总的观测值为 d_k , 则包括 GNSS 的 N, E, U 向位移 d_{gnss} 和约束条件虚拟观测值 d^V, d^+ 。设待估参数为 \hat{x} , 则包括每个历元的断层滑移 s 和滑移率 \dot{s} 、GNSS 位移时序中的初值 a_0 、线性项 b 、周期项系数 a_1, a_2, b_1, b_2 和超参数 $\sigma, \gamma, \beta, \alpha$ 。设观测值误差项为 ε , 包括 $\varepsilon_{\text{gnss}}, \varepsilon_V, \varepsilon_+$, 其协方差阵可表示为:

$$\mathbf{R}_k = \begin{vmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{\text{gnss}} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \end{vmatrix} \quad (10)$$

则总观测方程可表示为:

$$d_k = \mathbf{H}_k \hat{x}_k + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \mathbf{R}_k) \quad (11)$$

在整个时间序列中, 设待估参数中除断层滑移 s 和滑移率 \dot{s} 外, 其它 10 个参数均为恒定参数, 不随时间改变。因此, 其转移矩阵为单位阵 I , 过程噪声矩阵为零, 则整个待估参数总转移矩阵和过程噪声矩阵分别为:

$$\mathbf{T} = \begin{vmatrix} \mathbf{T}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{10 \times 10} \end{vmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{vmatrix} \mathbf{Q}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{0}_{10 \times 10} \end{vmatrix} \quad (12)$$

正向状态预测向量为:

$$\bar{\mathbf{x}}_k = \mathbf{T} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} \quad (13)$$

相应协方差矩阵为:

$$\Sigma_{\bar{\mathbf{x}}_k} = \mathbf{T} \Sigma_{\hat{\mathbf{x}}_{k-1}} (\mathbf{T})^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (14)$$

第 k 历元新息向量可表示为:

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{d}_k - \mathbf{H}_k \cdot \bar{\mathbf{x}}_k \quad (15)$$

其协方差阵为:

$$\Sigma_{\mathbf{v}_k} = \mathbf{R}_k + \mathbf{H}_k \Sigma_{\bar{\mathbf{x}}_k} \mathbf{H}_k^T \quad (16)$$

根据卡尔曼滤波递推公式, 参数估值及其协方差阵可求解得:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \bar{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k \mathbf{v}_k \quad (17)$$

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}_k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \Sigma_{\bar{\mathbf{x}}_k} \quad (18)$$

$$\mathbf{K}_k = \Sigma_{\bar{\mathbf{x}}_k} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{R}_k + \mathbf{H}_k \Sigma_{\bar{\mathbf{x}}_k} \mathbf{H}_k^T)^{-1} \quad (19)$$

根据观测值的预报残差向量来进行卡尔曼滤波反演结果的精度评定, 求其单位权方差为:

$$\hat{\sigma}_k^2 = \frac{\bar{\mathbf{v}}_k (\Sigma_{\mathbf{v}_k})^{-1} \bar{\mathbf{v}}_k}{n} \quad (20)$$

其中, n 为观测值个数, 则第 k 历元参数估值的协方差阵为:

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}_k} = \hat{\sigma}_k^2 \Sigma_{\bar{\mathbf{x}}_k} \quad (21)$$

同样, 回代状态预测向量为:

$$\bar{\mathbf{x}}_k = (\mathbf{T})^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1} \quad (22)$$

相应协方差矩阵为:

$$\Sigma_{\bar{\mathbf{x}}_k} = (\mathbf{T})^{-1} (\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}_{k+1}} + \mathbf{Q}) (\mathbf{T})^{-T} \quad (23)$$

回代卡尔曼滤波参数估计与精度评定同正向。

2 试验分析

目标断层按图 1 所示, 沿走向和倾向划分为 $2.5 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 大小的子断层, 共 8×5 个方格, 每一方格代表一子断层在平面的投影, 星型符号表示测站。断层模型的具体参数如表 1 所示。设置断层为非均匀滑动, 滑移特征为逆冲兼走滑, 模拟 300 d 呈指数函数变化的滑移时间序列。其中, 每隔 30 d 的滑移分布见图 2。设置观测台站均匀分布在断层区域, 由 OKADA 弹性位错模型正演 300 d 地表站点 N、E、U 向的位移时间序列。在不同密度的测站分布和不同信噪比的情况下进行反演分析。

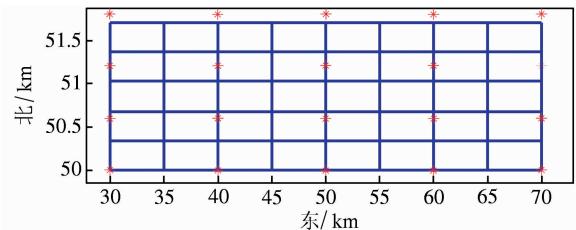


图 1 断层划分与测站分布

Fig. 1 Fault Division and Distribution of Observation Stations

表 1 断层参数

Tab. 1 Fault Parameters

下边缘中心位置(N,E)/km	方位角/°	长/km	宽/km	下边缘深/km	倾角/°
(50, 50)	90	40	5	5	70

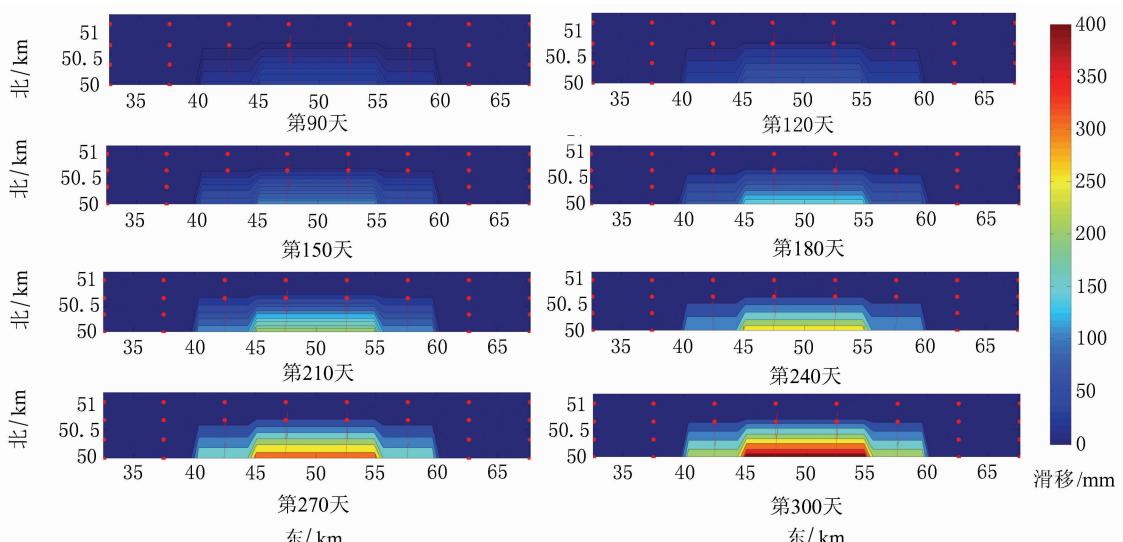


图 2 每隔 30 天的实际滑移分布

Fig. 2 Actual Slip Distribution Every 30 Days

试验1 设置观测站点沿走向和倾向分布间隔约为2倍子断层长和宽的距离, 观测站数为 5×4 个, 分布如图1中的红色星号。根据噪声功率谱密度, 由Fakenet模拟软件^[17]加入和实际位移大小相当的噪声, 白噪声和有色噪声水平之比约为1:1, 合成模拟的地表位移序列见图3。

利用表1的断层参数, 由§1构建的GNSS网卡尔曼滤波反演模型进行断层滑移时空分布反演。反演的所有子断层每隔30 d滑移分布见图4。在时间分布上, 反演的最大滑移量为350 mm, 而实际为400 mm。从时间分布上可以得出与实际断层滑移一致的演变特征。在空间分布上, 滑移量最大的位置位于东向52 km、北向50 km, 实际滑移量最大的地方为东向50 km、北向50 km; 整体空间分布与实际断层滑移分布较一致。若噪声水平不变, 减少站点分布密度, 反演效果较差。若点位分布密度保持不变, 放大噪声倍数, 反演效果较差。由此得出, 当断层滑移贡献位

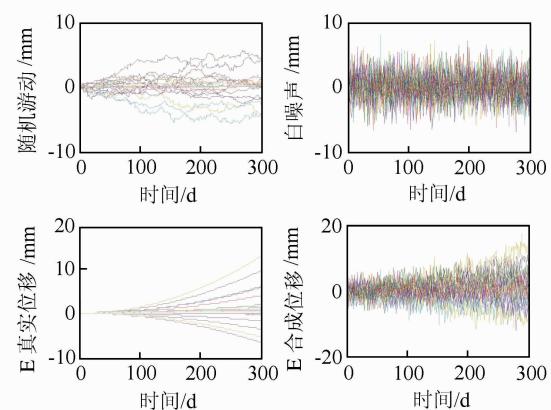


图3 模拟噪声与合成地表位移序列(试验1)

Fig. 3 Simulation Noises and Synthetic Displacement Series (Test 1)

移与噪声水平相当时, 测站分布密度沿走向和倾向至少为2倍子断层长和宽时, 顾及平滑约束和先验信息约束的网络卡尔曼滤波反演能够得到正确的断层滑移时空分布。

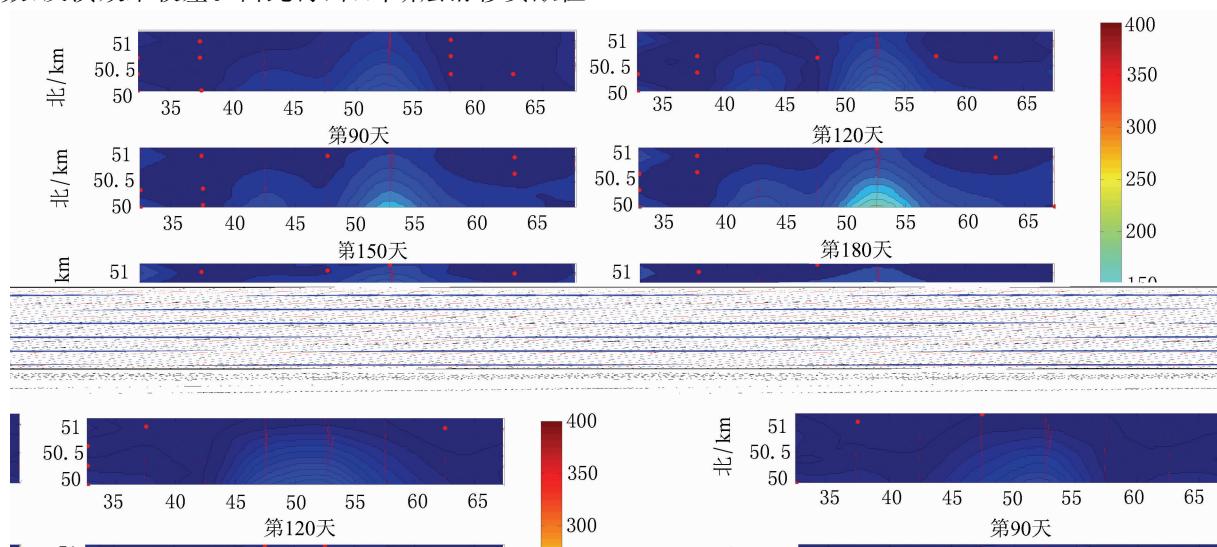


图4 试验1中每隔30天的反演滑移分布

Fig. 4 Distribution of Inversion Slip, Every 30 Days, Test 1

试2二 设置噪声水平同试验1, 增加观测站点的分布密度为原来的2倍, 即沿走向和倾向的分布间隔约等同子断层长和宽, 见图5。反演的每隔30 d滑移分布见图6。由图6可知, 在空间分布上, 整体比模拟试验1略有提高; 时间分布同模拟试验1, 反演所有子断层滑移量总体提高不明显。由此得出, 当断层滑移贡献位移与噪声水平相当时, 测站分布密度沿走向和倾向为2倍子断层长和宽时, 已能得到正确的断层滑移时空分布, 若增加测站分布密度, 提高并不显著。

试验3 点位分布密度同试验2, 噪声放大一倍; 其合成地表位移时间序列如图7所示; 反演的

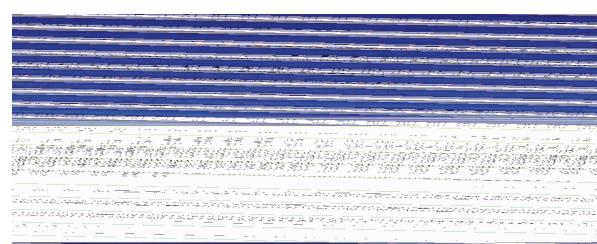


图5 测站点位分布

Fig. 5 Distribution of Observation Stations

每隔30 d断层滑移分布见图8。从反演结果看, 仍能正确得到断层滑移时空分布及其演化特征。由此得出, 当测站分布密度增大时, 能够容忍

GNSS 位移序列较低信噪比($\text{SNR} < 1$), 有效提高反演信噪比。

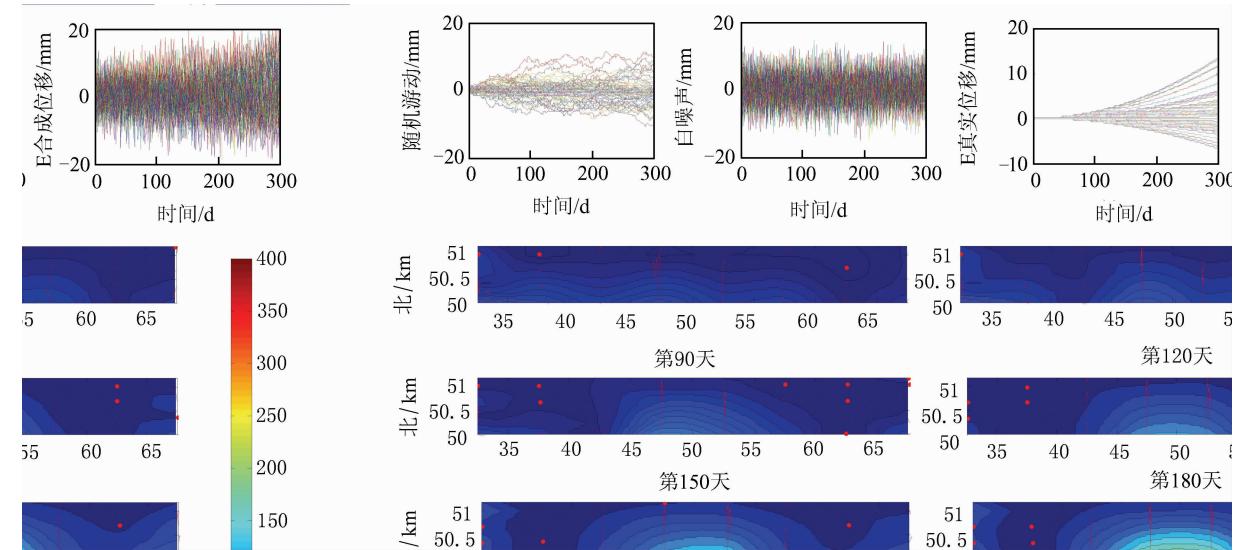


图 6 试验 2 中每隔 30 天的反演滑移分布

Fig. 6 Distribution of Inversion Slip, Every 30 Days, Test 2

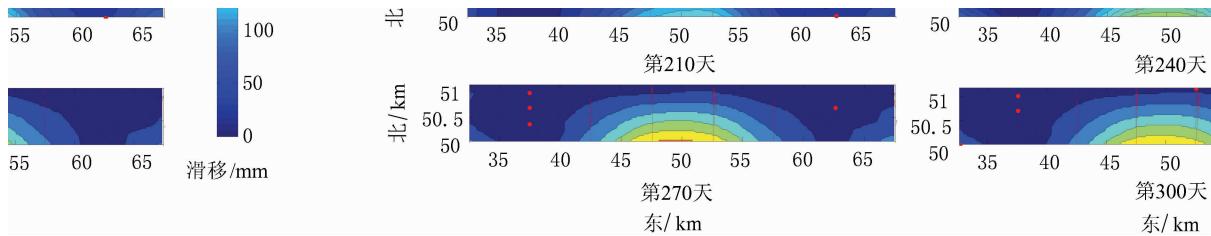


图 7 模拟噪声与合成地表位移序列(试验 3)

Fig. 7 Simulation Noises and Displacement Series (Test 3)

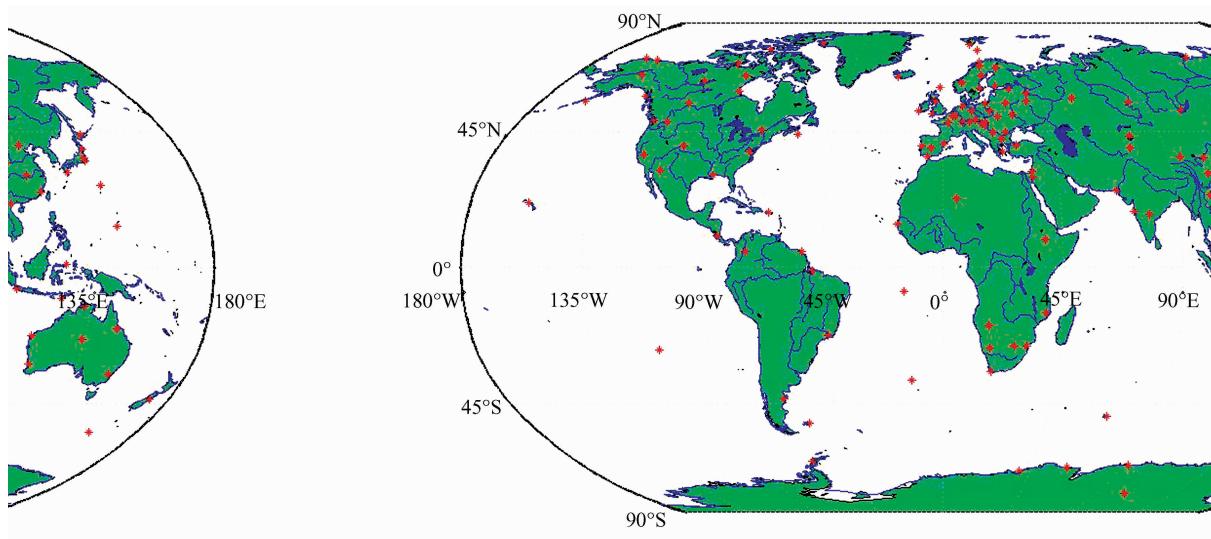


图 8 试验 3 中每隔 30 天的反演滑移分布

Fig. 8 Distribution of Inversion Slip, Every 30 Days, Test 3

3 结语

本文基于 GNSS 网络位移时空序列构建了

顾及平滑约束和先验信息约束的卡尔曼滤波反演模型。试验验证了通过滤波的方法能够有效分离空间不相关的噪声和空间高相关的断层形变, 准确估计断层滑移时空分布特征。通过试验得出,

当断层滑移贡献位移与噪声水平相当时,测站分布密度沿走向和倾向为2倍于断层长和宽时,已能反映出正确的断层滑移时空分布,若增加测站分布密度,反演结果提高并不显著。但增加测站分布密度,能有效提高反演信噪比,甚至适用于信噪比低于1的情况。由此,结合GNSS位移解算精度和所要检测的断层滑移大小与分布,可选择最优的GNSS站点布设方案。或根据现有的GNSS站点分布,选择最优的子断层划分。

在反演前需要对GNSS数据进行预处理,如剔除粗差、补齐缺失数据、修正阶跃项、去除共模误差等。当观测方程较少或参数之间相关时,为保持解的稳定性,要尽量减少参数个数。本文反演模型中没有考虑随机游动和GNSS坐标参考框架误差。在保持参数求解稳定的情况下,改正更多的误差项则反演效果将会更好。因为唯有尽可能去除各种相关噪声,才有可能检测慢地震或无震蠕滑等更微弱的断层形变时空分布信息,获取更为准确的断层滑移特征及演变过程。

参 考 文 献

- [1] Ikari M J, Marone C, Saffer D M, et al. Slip Weakening as a Mechanism for Slow Earthquakes [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(6): 468-472
- [2] Perfettini H, Avouac J P, Tavera H, et al. Seismic and Aseismic Slip on the Central Peru Megathrust [J]. *Nature*, 2010, 465(7 294): 78-81
- [3] Segall P, Matthews M. Time Dependent Inversion of Geodetic Data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102 (B10): 22 391-22 409
- [4] McGuire J J, Segall P. Imaging of Aseismic Fault Slip Transients Recorded by Dense Geodetic Networks [J]. *Geophysical Journal International*, 2003, 155(3): 778-788
- [5] Fang Ying, Jiang Zaisen, Gu Guohua. Network Filtering Method for North China Block Boundary Movement Analysis[J]. *Journal of Seismological Research*, 2007(2): 152-156(方颖,江在森,顾国华.用网络滤波方法探讨华北地块边界带运动[J].地震研究,2007(2): 152-156)
- [6] Wang Wuxing, Ma Li, Chen Qifu, et al. Extended Network Inversion Filter and Experimental Study on the Xianshuihe Fault Zone[J]. *Journal of Seismological Research*, 2008(1): 58-63(王武星,马丽,陈棋福,等.扩展网络反演滤波方法及其在鲜水河断裂带上的初步实验[J].地震研究,2008(1): 58-63)
- [7] Kositsky A P, Avouac J P. Inverting Geodetic Time Series with a Principal Component Analysis-based Inversion Method[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115 (B03401), DOI: 10.1029/2009JB006535
- [8] Radiguet M, Cotton F, Vergnolle M, et al. Spatial and Temporal Evolution of a Long Term Slow Slip Event: the 2006 Guerrero Slow Slip Event[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 184 (2): 816-828
- [9] Chen Guangqi, Wu Yanqiang, Jiang Zaisen, et al. Characteristics of Seismogenic Model of Mw 9.0 Earthquake in Tohoku, Japan Reflected by GPS Data[J]. *Chinese J Geophys*, 2013, 56(3): 848-856(陈光齐,武艳强,江在森,等. GPS资料反映的日本东北Mw 9.0地震的孕震特征[J].地球物理学报,2013, 56(3): 848-856)
- [10] Ding Kaihua, Xu Caijun, Wen Yangmao. Postseismic Deformation Associated with the 2008 Wenchuan Earthquake GPS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38 (2): 131-135(丁开华,许才军,温扬茂.汶川地震震后形变的GPS反演[J].武汉大学学报·信息科学版,2013, 38(2): 131-135)
- [11] Xu Keke, Wu Jicang, Wang Cheng. Analysis of Fault Aseismic Slip Feature Based on GNSS Displacement Time-Space Series[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40 (9): 1 247-1 252(徐克科,伍吉仓,王成.利用GNSS位移时空序列进行断层无震蠕滑特征分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2015, 40(9): 1 247-1 252)
- [12] Xu Keke, Wu Jicang. Detecting Transient Aseismic Slip Using GNSS Spatio-Temporal Data[J]. *Chinese J Geophys*, 2015, 40(7): 2 330-2 338(徐克科,伍吉仓.基于GNSS时空数据的瞬态无震蠕滑信息检测[J].地球物理学报,2015, 40(7): 2 330-2 338)
- [13] Okada Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985 75(N4): 1 135-1 154
- [14] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Spatio-Temporal Filtering Using Principal Component Analysis and Karhunen-loeve Expansion Approaches for Regional GPS Network Analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111 (B3): 1 581-1 600
- [15] Jonsson S, Zebker H, Segall P, et al. Fault Slip Distribution of the 1999 Mw 7.11 Hector Mine, California, Earthquake, Estimated from Satellite Radar and GPS Measurements[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4): 1 377-

1 389

- [16] Schwarz K P, Cannon M E, Wong R V C. A Comparison of GPS Kinematic Models for the Determination of Position and Velocity Along a Trajectory [J]. *Manuscripta Geodaetica*, 1989, 14: 345-353
- [17] Agnew D C. Realistic Simulations of Geodetic Network Data: The Fakenet Package[J]. *Seismological Research Letters*, 2013, 84(3): 426-432

Spatio-Temporal Inversion of Fault Slip Based on GNSS Observation Network

XU Keke¹ WU Jicang² LEI Weiwei¹

1 School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

2 College of Surveying and Geo-Information, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: According to the OKADA fault dislocation theory, the model for spatio-temporal inversion of fault slips is built based on Kalman filtering using the GNSS displacement time-space series. To acquire more subtle distribution of a fault slip, the fault is divided into many subfaults. The priori information and the Laplacian smoothing constraint is taken into account. According to the high spatial coherence of surface deformation from fault slip, the spatially-uncorrelated noise is separated effectively by a Kalman filtering inversion of the whole GNSS network. Simulation experiments indicate that since the displacement from the fault deformation is equivalent to the noises level, and GNSS point distribution intervals in strike and dip are equivalent to the length and width of the subfault at least, then the spatiotemporal distribution of the fault slip can be obtained accurately. When the distribution density of the observation stations continues to increase, improvements of the inversion effect are not apparent. However, the high distribution density of stations is very helpful to improve the Signal Noise Ratio(SNR) of the inversion.

Key words: GNSS; dynamic Kalman filter; fault slip; inversion

First author: XU Keke, PhD, specializes in the GNSS data processing and crustal deformation analysis. E-mail: 12xkk@tongji.edu.cn

Corresponding author: WU Jicang, PhD, professor. E-mail: jcwu@tongji.edu.cn

Foundation support: The National Program on Key Basic Research Project of China, No. 2013CB733304; the National Natural Science Foundation of China, No. 41404023.