

文章编号:1001-1595(2008)02-0168-04

中图分类号:P228

文献标识码:A

利用 DInSAR 和 GPS 综合方法估计地表 3 维形变速率

罗海滨¹, 何秀凤¹, 刘焱雄²

1. 河海大学 卫星及空间信息应用研究所, 江苏 南京 210098; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所 海洋测绘与工程信息研究中心, 山东 青岛 266061

Estimation of Three-dimensional Surface Motion Velocities Using Integration of DInSAR and GPS

LUO Hai-bin¹, HE Xiu-feng¹, LIU Yan-xiong²

1. Institute of Satellite Navigation & Spatial Information System of Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Center of Ocean Mapping and Engineering Information, The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao, 266061, China

Abstract: A revised method for derivation of three dimensional surface motions mapping from sparse GPS measurements and a DInSAR interferogram based on the investigation of Analytical Optimization Method (AOM) is proposed, which makes use of random field theory and Gibbs-Markov random fields within Bayesian statistical framework. Using the high accurate horizontal velocity derived from GPS as constrain, the proposed method, called the Directly Decomposing Method (DDM), can obtain accurate vertical velocity from the line of sight velocity of DInSAR. The DDM overcomes the numerical instability problem of the AOM and is simpler in realization. The results of inverse computer modeling are presented and show a drastic improvement of accuracy in vertical direction.

Key words: DInSAR; GPS; deformation monitoring; Markov random fields; integrated method

摘要: 在分析基于贝叶斯统计和马尔科夫随机场理论的解析优化法的基础上, 提出以 GPS 提供的高精度的水平形变速率作为约束, 利用直接分解法, 将 DInSAR 的斜距向形变速率分解成垂直形变速率。试验结果表明, 直接分解法有效地综合了 GPS 的高水平精度与 DInSAR 的高垂直精度优点, 且计算简单, 克服了解析优化法可能出现的数值不稳定问题。

关键词: DInSAR; GPS; 形变监测; 马尔科夫随机场; 综合方法

1 引言

GPS 可以提供高精度的 3 维运动信息, 但它提供的垂直方向坐标精度较低^[1]。世界上迄今 GPS 布网密度最高是日本的 GEONET 监测网, 其最短基线为 25 km^[2]。DInSAR 对垂直运动敏感, 但由于卫星重复周期的限制其时间分辨率低, 适合作形变监测的 SAR 数据最短重复周期为 35 天^[3-7]。此外, DInSAR 观测到的是斜距向形变信息, 需要以外部水平向形变信息为约束才能分解得到垂直方向的形变信息^[8]。由此可见, DInSAR 与 GPS 具有互补性, 将 DInSAR 与 GPS 技术进行综合可以得到高精度、高空间分辨率的 3 维形变信息。

Gudmundsson 等基于贝叶斯统计方法和马尔科夫随机场理论的能量函数最小原则, 利用 GPS 和 DInSAR 数据得到了 Rekjanes 半岛的连续 3 维形变速率场^[9,10]。但 Gudmundsson 等提出的方法在求能量函数最小时要用到模拟退火算法, 而模拟退火算法有时要花费较长的时间才能收敛, 有时甚至无法收敛到全局最小解^[11]。针对这一缺点, Samsonov 等提出了能量函数最小化的解析解法^[2,12]。该方法对 Gudmundsson 提出的能量函数进行了简化, 去掉了能量函数中要求形变场平滑的约束项, 通过对能量函数中每一变量求一阶导数得到了使能量函数最小的解析解。Samsonov 的方法虽克服了 Gudmundsson 方法的缺点, 但它存在数值计算不稳定的问题, 且没有考虑到 GPS

收稿日期: 2007-01-12; 修回日期: 2007-10-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50539110); 国家自然科学基金项目(50579013); 国家自然科学基金项目(40576044)

作者简介: 罗海滨(1979-), 男, 汉族, 黑龙江鸡西人, 博士生, 主要从事 InSAR 技术理论及应用研究。

E-mail: gpsandinsar@hhu.edu.cn

和 DInSAR 互补的特性。针对这些问题,本文提出以 GPS 提供的高精度的水平形变速率作为约束,利用直接分解方法,将 DInSAR 的斜距向形变速率分解成垂直形变速率。实验研究结果表明,本文提出的直接分解法很好地综合了 GPS 的高水平精度和 DInSAR 的高垂直精度,且计算简单,避免了解析优化法数值计算中的不稳定问题。

为了与 DInSAR 测得的高空间分辨率的斜距向形变速率进行综合求解,需要对 GPS 测得的离散的 3 维形变速率进行空间插值。本文利用 GSTAT (Program for Geostatistical Modeling, Prediction and Simulation) 提供的普通 Kriging 插值算法对 GPS 结果进行内插。普通 Kriging 插值法的优点是算法简单、插值精度较高,并能估计插值的精度。下面的讨论均建立在对 GPS 观测到的 3 维形变速率进行普通 Kring 插值加密的基础上。

2 形变速率方程的建立

2.1 解析优化法

DInSAR 测得的一维斜距向形变速率与水平和垂直向 3 维形变速率的关系可以表示为

$$V_{\text{los}} = [V_x \ V_y \ V_z][u_x \ u_y \ u_z]^T \quad (1)$$

式中, V_{los} 为 DInSAR 测得的斜距向形变速率,

$$\begin{bmatrix} v_x^i \\ v_y^i \\ v_z^i \end{bmatrix} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} C_{\text{ins}}^i C_y^i C_z^i u_x^i (V_{\text{los}}^i - u_y^i V_y^i - u_z^i V_z^i) + (C_{\text{ins}}^i C_x^i C_z^i u_y^i^2 + C_{\text{ins}}^i C_x^i C_y^i u_z^i^2 + C_x^i C_y^i C_z^i) V_x^i \\ C_{\text{ins}}^i C_x^i C_z^i u_y^i (V_{\text{los}}^i - u_x^i V_x^i - u_z^i V_z^i) + (C_{\text{ins}}^i C_y^i C_z^i u_x^i^2 + C_{\text{ins}}^i C_x^i C_y^i u_z^i^2 + C_x^i C_y^i C_z^i) V_y^i \\ C_{\text{ins}}^i C_x^i C_y^i u_z^i (V_{\text{los}}^i - u_x^i V_x^i - u_y^i V_y^i) + (C_{\text{ins}}^i C_x^i C_z^i u_y^i^2 + C_{\text{ins}}^i C_y^i C_z^i u_x^i^2 + C_x^i C_y^i C_z^i) V_z^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

这里

$$A = C_{\text{ins}}^i C_y^i C_z^i u_x^i^2 + C_{\text{ins}}^i C_x^i C_z^i u_y^i^2 + C_{\text{ins}}^i C_x^i C_y^i u_z^i^2 + C_x^i C_y^i C_z^i \quad (4)$$

2.2 直接分解法

不失一般性,以 X 方向为例对式(3)水平方向估值进行分析。若 GPS 布点密度较大,插值得到的 V_x^i 的精度高于 DInSAR 分解得到的 $V_{\text{los}}^i - u_y^i V_y^i - u_z^i V_z^i$ 精度,则对二者进行加权平均所得估值 v_x^i 的精度必然低于 V_x^i ;若 GPS 布点密度较小,受插值得到的垂直方向 V_z^i 精度急剧恶化的影响, DInSAR 分解得到的 $V_{\text{los}}^i - u_y^i V_y^i - u_z^i V_z^i$ 精度与插值得到的 V_x^i 的精度几乎相当,这时对二者进行加权平均对估值 v_x^i 的精度改善不大。在垂直方向上,由于 GPS 测得的 V_z^i 精度低,且 DInSAR 对水平形变不敏感^[3],使插值得到的 V_z^i 精度始终低于 DIn-

$[V_x \ V_y \ V_z]$ 为 V_{los} 在 X, Y, Z 3 个方向的分量, $[u_x \ u_y \ u_z]$ 为已知的斜距向单位矢量,本文取为 $[0.34 \ -0.095 \ 0.935]$ 。

根据马尔科夫随机场理论,由 GPS 插值得到的 3 维形变速率、DInSAR 测得的斜距向形变速率,并顾及式(1)有如下能量函数^[2~12]

$$u(v_x, v_y, v_z) = \sum_{i=1}^N \left\{ C_{\text{ins}}^i (V_{\text{los}}^i - u_x v_x^i - u_y v_y^i - u_z v_z^i)^2 + C_x^i (V_x^i - v_x^i)^2 + C_y^i (V_y^i - v_y^i)^2 + C_z^i (V_z^i - v_z^i)^2 \right\} \quad (2)$$

这里

$$C_{\text{ins}}^i = \frac{1}{2(\sigma_{\text{ins}}^i)^2}; \quad C_x^i = \frac{1}{2(\sigma_x^i)^2};$$

$$C_y^i = \frac{1}{2(\sigma_y^i)^2}; \quad C_z^i = \frac{1}{2(\sigma_z^i)^2}$$

V_{los}^i 为 DInSAR 观测到的斜距向形变速率, V_x^i, V_y^i, V_z^i 为 GPS 观测或插值得到的 X, Y, Z 3 个方向形变速率, v_x^i, v_y^i, v_z^i 为待求 X, Y, Z 3 个方向形变速率, σ_{ins}^i 为 DInSAR 斜距向形变速率观测标准差, $\sigma_x^i, \sigma_y^i, \sigma_z^i$ 为 GPS X, Y, Z 3 个方向形变速率观测标准差或插值标准差。

对式(2)中的未知变量求偏导并令其等于零即可得到使能量函数 u 最小的解析解为

SAR 分解得到的 $V_{\text{los}}^i - u_x^i V_x^i - u_y^i V_y^i$ 精度,因此,对二者进行加权平均所得估值 v_z^i 的精度必然低于 $V_{\text{los}}^i - u_x^i V_x^i - u_y^i V_y^i$ 的精度。基于以上分析,可直接令 $v_x^i = V_x^i, v_y^i = V_y^i$,并以此为约束将 DInSAR 斜距向形变速率分解到垂直方向,则有

$$\begin{bmatrix} v_x^i \\ v_y^i \\ v_z^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x^i \\ V_y^i \\ V_{\text{los}}^i - u_x^i V_x^i - u_y^i V_y^i \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)即为直接分解法的计算公式。

直接分解法较解析优化法具有如下优点:

1. 当 GPS 插值精度高时,在 X, Y, Z 3 个方向上直接分解法估值精度高于解析优化法;当 GPS 插值精度低时,在水平方向上直接分解法估值精度与解析优化法相当,在垂直向上估值精度高于解析优化法;

2. 计算简单,避免了式(3)中矩阵 A 的求逆问题。

3 数据模拟试验研究结果与分析

根据参考文献[12],利用式(6)在 100×100 2 维栅格点上模拟水平及垂直方向形变速率。

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x^0 \\ V_y^0 \\ \left[a + 2\pi b \cos(2\pi t) \right] \exp\left(-\frac{(x-50)^2 + (y-50)^2}{w}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, V_x^0, V_y^0 为形变的初始速率, a, b, w 为常数,其中 w 用来控制形变的范围, t 为形变发生的时间间隔。

由式(6)可以看出,模拟的形变速率水平方向是匀速变化的。垂直方向上包含两种运动形式,一种是随着时间的推移持续的沉降,另一种是周期性的沉降和上升(如地下水的季节性开采和回灌造成的周期形变等)。图1显示了模拟结果。

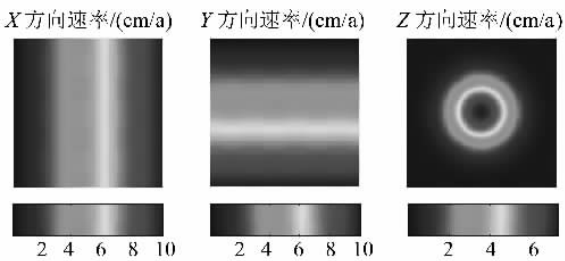


图1 无噪声的3 维形变速率模拟

Fig. 1 Simulation of Three-dimensional surface motion velocities without noise

式(6)没有考虑观测噪声,为了反映实际应用中的观测数据情况,需对式(6)模拟的数据进行加噪处理。对于 GPS 观测数据,水平方向加入标准差为 0.5 cm 的高斯白噪声,垂直方向加入标准差为 3 cm 的高斯白噪声。对于 DInSAR 数据,水平方向加入标准差为 2 cm 的高斯白噪声,垂直方向加入标准差为 0.5 cm 的高斯白噪声,并利用式(1)将其投影到斜距方向。

随机选取 20、100 和 200 个 GPS 点并加上相应的噪声。利用普通 Kriging 插值方法对加噪后的 GPS 观测数据进行插值得到与 DInSAR 空间分辨率相同的 3 维形变速率。图2 为 100 个 GPS 点

插值结果。这里需要指出的是在插值样本点的数量和位置一定时,普通 Kriging 方法的插值精度主要取决于变异函数模型的选择。通过试验研究,本文在 X, Y 方向选指数变异模型,在 Z 方向选线性变异模型。

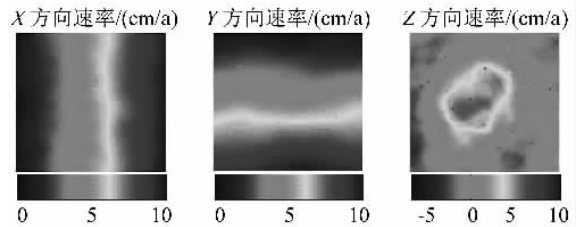


图2 GPS 插值得到的 3 维形变速率

Fig. 2 Three-dimensional surface motion velocities using GPS

比较图1 和图2 可以看出,GPS 插值结果在水平方向恢复得较好,在垂直方向恢复不理想。这是由于 GPS 垂直观测精度低于水平观测精度的原因。利用解析法和直接分解法对 GPS 数据和 DInSAR 数据进行综合处理,结果见表1 和图3。由于水平方向结果与图2 几乎相同,这里不再重复给出。由图3 可以看出解析法得到的结果在垂直方向上较 GPS 插值得到的结果有了明显的改善,而直接分解方法较解析法更优。

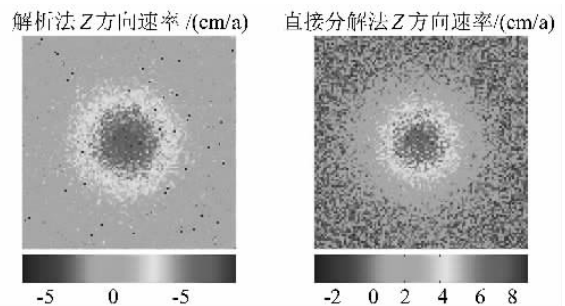


图3 解析法和直接分解法 Z 方向速率对比

Fig. 3 The Z velocity field from AOM and DDM

表1 列出了采用 GPS 插值法、解析法和直接分解方法得到的形变速率误差标准差。由表1 可以看出,GPS 布点密度较小时,在水平方向上解析法确实能改进估值精度,但改进程度仅有 0.03% 和 0.02%,且随着 GPS 布点密度的增大解析法的估值精度逐渐低于直接分解法。这一模拟结果也较好地验证了 2.2 节的分析。在垂直向,直接分解法取得了最好的集成效果,比 GPS 插值方法和解析法精度平均改善了 29.5% 和 8.3%,且结果几乎不随 GPS 布点密度的大小而改变。

表 1 形变速率误差标准差比较

Tab. 1 The standard errors of the deformation velocity

	/(cm/a)		
	V_x	V_y	V_z
20 个 GPS 点			
GPS 插值法	0.345 1	0.546 0	1.631 7
解析法	0.345 0	0.545 9	0.895 9
直接分解法	0.345 1	0.546 0	0.858 3
100 个 GPS 点			
GPS 插值法	0.289 2	0.161 4	1.115 5
解析法	0.289 7	0.161 4	0.934 1
直接分解法	0.289 2	0.161 4	0.860 3
200 个 GPS 点			
GPS 插值法	0.123 7	0.076 8	0.899 8
解析法	0.124 1	0.076 9	0.977 2
直接分解法	0.123 7	0.076 8	0.854 2

4 结 论

本文综合 DInSAR 和 GPS 技术来估计地表连续 3 维形变速率。在深入分析现有的基于贝叶斯统计和马尔科夫随机场理论的解析优化法的基础上,提出以 GPS 提供的高精度的水平形变速率作为约束,利用直接分解方法,将 DInSAR 的斜距向形变速率分解成垂直形变速率。通过试验研究得到如下结论:

1. 利用 GPS 和 DInSAR 数据,采用解析优化方法估计的垂直形变速率较单独采用 GPS 插值方法精度有很大的提高,但由于 DInSAR 对水平形变速率不敏感,所以解析优化法对提高水平形变速率精度不理想。特别当 GPS 网点密度大,插值精度高时,解析优化法提供的水平形变速率估计精度反而会低于单独 GPS 插值方法。这与参考文献[12]所得到的结果是相同的。

2. 本文提出的利用 GPS 将 DInSAR 的斜距向形变速率分解为垂直向形变速率的直接分解方法兼顾了 GPS 高水平精度和 DInSAR 高垂直精度的特点,且计算简单,避免了解析法的数值计算不稳定问题。试验结果表明,直接分解方法可以提供最优的估计值。

参考文献:

[1] HE Xiu-feng, CHEN Yong-qi, SANG Wen-gang, YANG Guang. Pseudolite-augmented GPS for Deformation Monitoring Analysis and Experimental Study[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(4):315-320. (何秀凤,陈永奇,桑文刚,杨光.伪卫星增强 GPS 方法在变形监测中的应用研究[J].测绘学报,2006,35(4):315-320.)

[2] SAMSONOV S, TIAMPO K, RUNDLE J, LI Z. Application of DInSAR-GPS Optimization for Derivation of Fine Scale Surface Motion Maps of Southern California[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(2):512-521.

[3] ZHA Xian-jie, FU Rong-shan, DAI Zhi-yang. The Sensitivity of DInSAR to Surface Deformation in Different Direction[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(2):133-137. (查显杰,傅容珊,戴志阳. DInSAR 技术对不同方位形变的敏感性研究[J].测绘学报,2006,35(2):133-137.)

[4] LUO Hai-bin, HE Xiu-feng. Integration of InSAR and GPS for Ground Deformation Monitoring[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, (6). (罗海滨,何秀凤.应用 InSAR 与 GPS 集成技术监测地表形变探讨[J].遥感技术与应用,2006,(6).)

[5] HE Min, HE Xiu-feng. Interferometric Synthetic Aperture Radar and Its Application to Deformation Monitoring[J]. Hydro-power Automation and Dam Monitoring, 2005, 29(20):45-48. (何敏,何秀凤.合成孔径雷达干涉测量技术及其在形变灾害监测中的应用[J].水电自动化与大坝监测,2005,29(2):45-48.)

[6] GE L, CHENG E, LI X, RIZOS C. Quantitative Subsidence Monitoring: the Integrated InSAR, GPS and GIS Approach [A]. The 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Based Services[C]. Melbourne: Global Positioning Systems Society Inc, 2003. 22-25.

[7] QIAO Xue-jun, LI Shu-sun, YOU Xin-zhao, DU Rui-lin, LOGAN T. Monitoring Crustal Deformation by GPS and InSAR in the Three Gorge Area[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2002, 7(4):451-457.

[8] SUN Jian-bao, LIANG Fang, XU Xi-wei, GONG Peng. 3D Co-seismic Deformation Field of the Bam Earthquake(Mw6.5) from Ascending and Descending Pass ASAR Radar Interferometry[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(4). (孙建宝,梁芳,徐锡伟,宫鹏.升降轨道 ASAR 雷达干涉揭示的巴姆地震(Mw6.5)3D 同震形变场[J].遥感学报,2006,10(4):489-496.)

[9] GUDMUNDSSON S, SIGMUNDSSON F, CARSTENSEN J M. Three-Dimensional Surface Motion Maps Estimated from Combined Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS Data [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(B10):1-14.

[10] GUQMUNDSSON S. Crustal Deformation Mapped by Combined GPS and InSAR[D]. Copenhagen: The Technical University in Denmark, 2000.

[11] LI S Z. Markov Random Field Modeling in Image Analysis [M]. Tokyo: Springer, 2001.

[12] SAMSONOV S, TIAMPO K. Analytical Optimization of DInSAR and GPS Dataset for Derivation of Three-Dimensional Surface Motion[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1):107-111.

(责任编辑:丛树平)