

GNSS 站坐标序列速度和振幅变化的探测与分析

李伟伟^{1,2}, 沈云中^{1,2}

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 同济大学 空间信息科学及可持续发展应用中心, 上海 200092)

摘要: 提出一种 GNSS(global navigation satellite system)站坐标序列速度和振幅变化的探测算法. 该算法根据二叉树原理遍历搜索所有可能发生变化的历元, 并进行速度和振幅变化的建模分析, 再采用 F 检验确定模型的显著性. 模拟数据验证算法的正确性后, 将该算法应用到中国地壳运动观测网络五个基准站的高程实测数据的探测与分析中, 结果表明本文的模型相较于传统的时间序列拟合模型, 拟合优度更高, 更能反映数据的真实变化趋势与细部变化特征.

关键词: GNSS 站坐标序列; 函数模型; 序列变化探测; F 检验

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

Detection and Analysis of Velocity and Amplitude Changes in GNSS Coordinate Series

LI Weiwei^{1, 2}, SHEN Yunzhong^{1, 2}

(1. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Spatial Information Science and Sustainable Development Application Center, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A method, global navigation satellite system (GNSS), is proposed for detecting velocity and amplitude changes based on the principal of binary tree for searching the most possible change epochs and testing the velocity and amplitude changes. Then the change epochs are tested by F -test statistics. The proposed method verified with simulation data is applied to the analysis of the vertical coordinate time series of 5 base stations in crustal movement observation network of China. The results show that the proposed method has the higher fitting accuracy and the better reflection of the observation data.

Key words: global navigation satellite system (GNSS) coordinate series; function model; amplitude change detection; F test

长期 GNSS 站坐标实测序列中, 不可避免地出现阶跃、速度、周期和振幅变化, 这些变化会对数据结果与分析产生很大的影响. 因此精确探测变化历元是 GNSS 站坐标序列处理中的一项重要内容, 也是建立高精度拟合模型, 估计相关地球物理参数, 揭示地球板块运动特性的前提. 国内外学者做了一系列相关研究, 分析了阶跃变化的原因, 包括地震、环境变化、仪器故障及更换、处理方法或模型变化等, 并给出了阶跃探测的方法^[1-2]. 对于观测序列的速度和周期振幅变化, 目前的处理方式大多数选择忽略或者分时间段拟合分析^[3], 但忽略会掩盖序列的细部变化特性, 因此无法准确反映地球物理因素的变化, 而分时段分析则在时段的选择上比较主观. Nikolaidis^[4]考虑了地震前后坐标序列的速度发生变化, 在模型中加入了同震位移和指数衰减来拟合 GNSS 站坐标观测序列. 事实上, 地震并不一定对 GNSS 站的速度产生影响, 而速度变化也不一定都是地震引起的^[5-6]. 例如, 受大气、非潮汐海洋、积雪和土壤水等不恒定的地表质量负荷变化以及地表温度和地壳基岩的热胀冷缩等非构造因素影响^[7-9], GNSS 站周期振幅在高程方向也可能发生变化. 为此 Ostini^[10]提出了 FODITS (find outliers and discontinuities in time series) 方法对序列中可能出现的所有变化(包括阶跃、速度、周期和振幅)进行探测, 该方法采用经验阈值判断坐标序列是否发生了变化, 并对不同的变化探测给定不同的阈值.

本文基于二叉树原理遍历搜索和 F 检验理论建立了 GNSS 站坐标序列速度和振幅变化的探测算法. 模拟试验验证其正确性后, 将其应用到中国地壳运动观测网络五个基准站高程方向坐标序列的分析中, 探讨各基准站的形变特性和测试算法在实测数据中的表现.

收稿日期: 2013-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(41274035); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2012CB957703)

第一作者: 李伟伟(1986—), 女, 博士生, 主要研究方向为 GNSS 数据处理. E-mail: whereareou@126.com

通讯作者: 沈云中(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为卫星重力测量及 GNSS 理论研究.

E-mail: yzshen@tongji.edu.cn

1 探测原理与方法

1.1 基本模型

GNSS 站坐标观测序列的观测模型^[4]为

$$y(t_i) = s(t_i) + z(t_i) + h(t_i) + e_i \quad (1)$$

如果 GNSS 站的速度、周期和振幅不发生变化,则有

$$s(t_i) = y_0 + r_0 t_i, \quad h(t_i) = \sum_{j=1}^n g_j H(t_i - T_j), \quad z(t_i) = \sum_{f=1}^2 [c_{fb} \sin(2\pi f t_i) + d_{fb} \cos(2\pi f t_i)],$$

t_i 是以年为单位的 GNSS 站单日历元, $s(t_i)$ 为线性趋势项, y_0 为常数项, r_0 为线性速度, $z(t_i)$ 为周期项. $\sqrt{c_{fb}^2 + d_{fb}^2}$ 为振幅, 其中 $f=1$ 表示年周期项, $f=2$ 表示半年周期项, 若年周期存在多个振幅, 也就是说, 存在本文所讨论的振幅变化, 则用 $c_{1b}, d_{1b} (b=1, 2, \dots, n)$ 表示, 相应的年周期振幅为 $\sqrt{c_{1b}^2 + d_{1b}^2}$. $h(t_i)$ 为发生在历元 T_j 大小为 g_j 的阶跃, H 表示阶梯函数, e_i 为观测误差.

1.2 探测算法

由于 F 检验是一种单维检验方法, 不能同时探测 GNSS 站坐标序列中的速度和振幅变化. 假设序列中只有单一项(线性趋势项或周期项)发生变化, 探测过程主要分为以下两个步骤:

(1) 搜索变化点

如果在数据预处理中已剔除粗差和修正阶跃项, 对于长度为 N 的观测序列 $\mathbf{y} = [y(t_1) \ y(t_2) \ \dots \ y(t_N)]^T$, 若半年项很小可忽略, 模型(1)中 $s(t_i)$ 和 $z(t_i)$ 可表示为

$$\begin{aligned} s(t_i) &= y_0 + r_0 t_i, \\ z(t_i) &= c_{11} \sin(2\pi t_i) + d_{11} \cos(2\pi t_i) \end{aligned} \quad (2)$$

假定此时观测模型(1)为

$$\mathbf{y} = \mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{e}, \quad D(\mathbf{y}) = \sigma_0^2 \mathbf{P}^{-1} \quad (3)$$

其中,

$$\mathbf{x} = [y_0 \ r_0 \ c_{11} \ d_{11}]^T$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \sin(2\pi t_1) & \cos(2\pi t_1) \\ 1 & t_2 & \sin(2\pi t_2) & \cos(2\pi t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_N & \sin(2\pi t_N) & \cos(2\pi t_N) \end{bmatrix}$$

\mathbf{P} 为观测序列的权阵, 本文采用对角阵, 其元素为各历元坐标解算值方差的倒数. σ_0^2 为单位权方差, 根据最小二乘原理, 后验单位权方差估值

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{B}\hat{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}(\mathbf{y} - \mathbf{B}\hat{\mathbf{x}})}{N - m} \quad (4)$$

m 为参数向量维数. 如果 GNSS 站的速度或振幅在 t_k 历元发生了变化, 需要从该历元起增加描述其变化的参数, 对应模型(1)中变化后的 $s(t_i)$ 或 $z(t_i)$ 可分别表示为

$$s(t_i) = \begin{cases} y_0 + r_0 t_i, & t_i \leq t_k \\ y_0 + r_0 t_i + r_1 (t_i - t_k), & t_i > t_k \end{cases} \quad (5)$$

$$z(t_i) = \begin{cases} c_{11} \sin(2\pi t_i) + d_{11} \cos(2\pi t_i), & t_i \leq t_k \\ c_{12} \sin(2\pi t_i) + d_{12} \cos(2\pi t_i), & t_i > t_k \end{cases} \quad (6)$$

其中, $r_0 + r_1$ 为变化后的速度, $\sqrt{c_{12}^2 + d_{12}^2}$ 为变化后的振幅. 此时参数向量及其设计矩阵分别用 \mathbf{x}_k 和 \mathbf{B}_k 表示, 相应的观测模型为

$$\mathbf{y} = \mathbf{B}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{e}, \quad D(\mathbf{y}) = \sigma_k^2 \mathbf{P}^{-1} \quad (7)$$

根据式(5)和(6), 若对速度变化进行探测, 式(7)中的 \mathbf{x}_k 和 \mathbf{B}_k 可分别表示为

$$\mathbf{x}_k = [y_0 \ r_0 \ r_1 \ c_{11} \ d_{11}]^T$$

$\mathbf{B}_k =$

$$\begin{bmatrix} 1 & t_1 & 0 & \sin(2\pi t_1) & \cos(2\pi t_1) \\ 1 & t_2 & 0 & \sin(2\pi t_2) & \cos(2\pi t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_k & 0 & \sin(2\pi t_k) & \cos(2\pi t_k) \\ 1 & t_{k+1} & t_{k+1} - t_k & \sin(2\pi t_{k+1}) & \cos(2\pi t_{k+1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_N & t_N - t_k & \sin(2\pi t_N) & \cos(2\pi t_N) \end{bmatrix}$$

若对振幅变化进行探测, 则

$$\mathbf{x}_k = [y_0 \ r_0 \ c_{11} \ d_{11} \ c_{12} \ d_{12}]^T$$

$$\mathbf{B}_k = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \sin(2\pi t_1) & \cos(2\pi t_1) & 0 & 0 \\ 1 & t_2 & \sin(2\pi t_2) & \cos(2\pi t_2) & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_k & \sin(2\pi t_k) & \cos(2\pi t_k) & 0 & 0 \\ 1 & t_{k+1} & 0 & 0 & \sin(2\pi t_{k+1}) & \cos(2\pi t_{k+1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_N & 0 & 0 & \sin(2\pi t_N) & \cos(2\pi t_N) \end{bmatrix}$$

模型(7)的后验单位权方差估值

$$\hat{\sigma}_k^2 = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{B}_k \hat{\mathbf{x}}_k)^T \mathbf{P} (\mathbf{y} - \mathbf{B}_k \hat{\mathbf{x}}_k)}{N - m_k} \quad (8)$$

其中, m_k 为变化后模型的参数向量维数。

取 $k = 2, 3, \dots, N-1$, 按照式(8)逐个计算模型(7)的后验单位权方差, 可得到一组方差序列 $\{\hat{\sigma}_k^2\}$, 其最小值对应的历元 t_p ($2 \leq p \leq N-1$) 即为最可能发生速度或振幅变化的历元。采用 F 检验对该变化历元的显著性进行检验, 如果在历元 t_p 参数变化不显著, 则单位权方差估值 $\hat{\sigma}_0^2$ 和 $\hat{\sigma}_p^2$ 应统计上一致, 否则 $\hat{\sigma}_0^2 > \hat{\sigma}_p^2$, 其检验统计量

$$F = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\hat{\sigma}_p^2} \sim F_\alpha(N - m, N - m_p) \quad (9)$$

选择显著性水平 α , 采用单尾检验, 若 $F \geq F_\alpha$, 表明 t_p 历元的变化显著。然后根据二叉树原理, 将长度为 N 的区间分成两个区间 $[t_1, t_p]$ 和 $[t_{p+1}, t_N]$, 按照上述过程分别在两个区间上继续搜索探测。若 $F < F_\alpha$, 则认为区间内没有速度或振幅变化, 搜索探测终止。

(2) 参数显著性检验

经过步骤(1)检测出来的变化历元, 只是各个子区间上的显著变化历元, 对于整个序列而言是否均显著, 还需要进行参数显著性检验。假定检测出来的 n 个变化历元对应于模型(1)中变化后的线性趋势项或周期项的拟合模型分别为

$$s(t_i) = \begin{cases} y_0 + r_1 t_i, & t_i \leq t_1 \\ y_0 + r_1 t_i + r_2 (t_i - t_1), & t_i > t_1 \\ \vdots \\ y_0 + r_1 t_i + \dots + r_n (t_i - t_n), & t_i > t_n \end{cases}$$

$$z(t_i) = \begin{cases} c_{11} \sin(2\pi t_i) + d_{11} \cos(2\pi t_i), & t_i \leq t_1 \\ c_{12} \sin(2\pi t_i) + d_{12} \cos(2\pi t_i), & t_1 < t_i \leq t_2 \\ \vdots \\ c_{1n} \sin(2\pi t_i) + d_{1n} \cos(2\pi t_i), & t_i > t_n \end{cases} \quad (10)$$

同理, 可计算该模型的后验单位权方差估值

$$\hat{\sigma}'_0^2 = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{B}' \hat{\mathbf{x}}')^T \mathbf{P} (\mathbf{y} - \mathbf{B}' \hat{\mathbf{x}}')}{N - m'} \quad (11)$$

其中, $\hat{\mathbf{x}}'$ 为模型参数估值向量, \mathbf{B}' 为设计矩阵, 其具体形式可以参考模型(7)给出, m' 为其维数。对于整个序列而言, 如果分区间检测出来 n 个变化历元 (S_n), 剔除 $t_k \in S_n$ 后重新建模, 并计算后验单位权方差估值

$$\hat{\sigma}'_k^2 = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{B}'_k \hat{\mathbf{x}}'_k)^T \mathbf{P} (\mathbf{y} - \mathbf{B}'_k \hat{\mathbf{x}}'_k)}{N - m'_k} \quad (12)$$

其中, $\hat{\mathbf{x}}'_k$ 为新模型参数估值向量, m'_k 为其维度, \mathbf{B}'_k 为新模型设计矩阵。逐个取 $t_k \in S_n$, 分别计算其后验单位权方差 $\{\hat{\sigma}'_k^2\}$, 其最小值对应的历元 t_p 即为最可能的不显著点, 对其进行 F 检验, 构造统计量

$$F' = \frac{\hat{\sigma}'_p^2}{\hat{\sigma}'_0^2} \sim F_\alpha(N - m'_p, N - m') \quad (13)$$

若 $F' \geq F_\alpha$, 则检测出来所有历元均是显著的。否则, 删除 t_p 。按照上述步骤对剩余的变化点继续进行检验, 直到剩余的点均为显著变化历元。

步骤(1)和(2)均涉及到显著性水平 α , 对于 α 的选择, 既不能太严格, 也不能太宽松, 应该遵循以下两个准则: ① 能够探测出来序列中的所有变化点; ② 探测出来的变化点应该都是真实的变化点。但事实上, 并不能准确地知道实测数据中的变化点, 因此 α 就很难确定。在本文中, 通过模拟与实测误差一致的数据, 人为设定变化点, 并进行大量试验, 发现振幅变化探测取 $\alpha = 0.2$, 速度变化探测取 $\alpha = 0.1$ 时, 能够满足以上两个准则。因此, 实测数据也取同样的显著性水平。

综合步骤(1)和(2), GNSS 站坐标观测序列中速度或振幅变化单独搜索探测流程如图 1 所示。

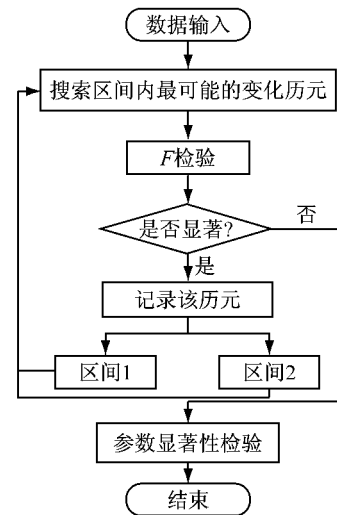


图 1 速度或振幅变化探测流程图

Fig.1 Change detection flowchart of velocity or amplitude

1.3 速度和振幅迭代探测

第 1.2 节详细介绍了 GNSS 站坐标观测序列中速度或振幅变化单独搜索探测的算法, 而实际的 GNSS 站观测序列中可能既存在速度变化项, 也包含不同周期的不同振幅项。因此需要迭代算法对模型(1)中速度和振幅变化点进行探测。迭代步骤如下: ① 不考虑观测序列中的振幅变化, 采用第 1.2 节

中的方法进行速度变化探测;② 固定探测出来的速度变化历元,按照第 1.2 节中的方法进行振幅变化探测;③ 固定探测出来的振幅变化历元,重新进行速度变化探测;④ 重复第②和③步,直至前后两次迭代探测的速度和振幅变化历元均不再变化为止。

顺便指出,本文算法的有效性并不仅限于对速度和振幅变化的探测,观测方程中的任何参数出现显著变化,均可以用上述迭代进行探测。例如,如果出现阶跃变化,可以采用类似的探测步骤,确定 x_k 和 B_k 对阶跃变化历元进行探测。因此同时探测阶跃变化、速度变化和振幅变化时,只需将阶跃变化的探测加入到探测步骤①~④之中,多一层循环过程即可实现。

2 算例分析

2.1 模拟数据

模拟序列的时间跨度为 2000—2013 年,其初始速度 $r_0 = 4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,并在 $T_1 = 2004.0608$ 年和 $T_2 = 2010.0872$ 年发生 $r_1 = 11 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $r_2 = -17$

$\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度变化;以 $T_3 = 2005.2785$ 年和 $T_4 = 2010.8270$ 年为变化点模拟三段不同的周年振幅,分别为 22.36, 10.43 和 19.38 mm;在模拟序列中添加噪声水平为 10 mm 的高斯白噪声^[10]。然后采用不考虑速度和振幅变化模型(传统模型)与考虑速度和振幅变化模型(本文模型)对模拟数据进行拟合。拟合结果和拟合后的残差见图 2,解算的模型参数见表 1,其中参考值表示加噪声后,直接用模拟的变化时刻(而不是探测出的时刻)建模解算的模型参数, A_i ($i=1,2,3$)表示振幅。

由图 2 及表 1 可知,传统模型不能够准确地反映原始序列,解算的参数与参考值存在较大的偏差,且残差中也明显存在残余的速度项和周期项,这是由于模型不准确造成残差中含有模型误差。在这种情况下,如果对坐标序列进行噪声分析,提取区域共模误差等,其结果是不可靠的。相比较而言,本文模型准确地探测出了速度和振幅的变化时刻,解算的模型参数与参考值偏差在 3 倍误差允许范围内,残差与模拟噪声统计相符。可见本文建立的速度和振幅变化探测算法是有效的。

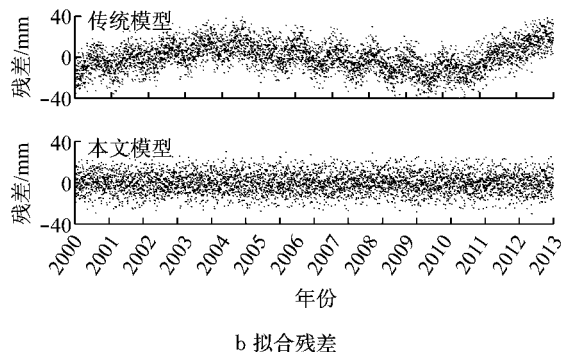
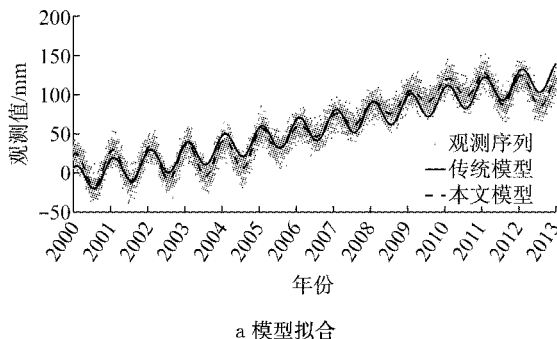


图 2 模型拟合和模型残差

Fig.2 Fitting of different models and residuals of fitting

表 1 不同模型解算的参数

Tab.1 Parameters of different models

| 解算方式 | 速度/($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$) | | | 速度变化时刻/年 | | 振幅/mm | | | 振幅变化时刻/年 | |
|------|--|------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | r_0 | r_1 | r_2 | T_1 | T_2 | A_1 | A_2 | A_3 | T_3 | T_4 |
| 参考值 | 4.30±0.16 | 10.61±0.22 | -17.00±0.31 | 2004.0608 | 2010.0872 | 22.10±0.31 | 10.64±0.31 | 19.35±0.50 | 2005.2785 | 2010.8270 |
| 传统模型 | | 10.28±0.05 | | | | | 17.19±0.28 | | | |
| 本文模型 | 4.33±0.16 | 10.44±0.22 | -17.41±0.31 | 2004.0365 | 2010.1736 | 22.13±0.31 | 10.73±0.31 | 19.23±0.50 | 2005.2056 | 2010.8216 |

为了说明模型的搜索效率和模型拟合效果,表 2 列出了对上文模拟实验采用不同模型的搜索计算耗时(计算机为四核 Intel Core i5 处理器,CPU 主频 3.10 GHz,计算软件为 Matlab2010a),模型拟合后

的均方根误差

$$\chi = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (y_j - y')^2}{N}} \quad (14)$$

拟合优度

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - y')^2}{\sum_{j=1}^N y_j^2} \quad (15)$$

其中 y' 表示坐标拟合值。

通过对比发现,由于本文模型算法需要在每个点上至少搜索一次,每次都要解算参数,相比传统模型只需要解算一次参数而言,需要消耗一些时间,但这种时间消耗在计算机快速发展和实测数据中速度、振幅变化点不会太多的情况下,是可以承受的。

表 2 模拟数据计算效率与拟合效果

Tab.2 Computational efficiency and fitting effect with simulative data

| 模型 | 耗时/s | χ/mm | R^2 |
|------|-------|------------------|-------|
| 传统模型 | 0.03 | 13.45 | 0.96 |
| 本文模型 | 36.54 | 9.78 | 0.98 |

表 3 探测偏差统计

Tab.3 The statistic bias of detected epochs and the setting epochs

| 噪声水平/ mm | 速度探测偏差/d | | | | 振幅探测偏差/d | | | |
|-------------|----------|------|------|------|----------|------|------|------|
| | 最大值 | | 均值 | | 最大值 | | 均值 | |
| | 变化 1 | 变化 2 | 变化 1 | 变化 2 | 变化 1 | 变化 2 | 变化 1 | 变化 2 |
| 2 | 30 | 9 | 4 | 3 | 29 | 20 | 2 | 10 |
| 4 | 20 | 19 | 8 | 7 | 40 | 39 | 8 | 16 |
| 6 | 29 | 32 | 12 | 10 | 58 | 43 | 13 | 22 |
| 8 | 43 | 46 | 16 | 14 | 70 | 84 | 17 | 27 |
| 10 | 64 | 55 | 18 | 15 | 75 | 83 | 20 | 32 |

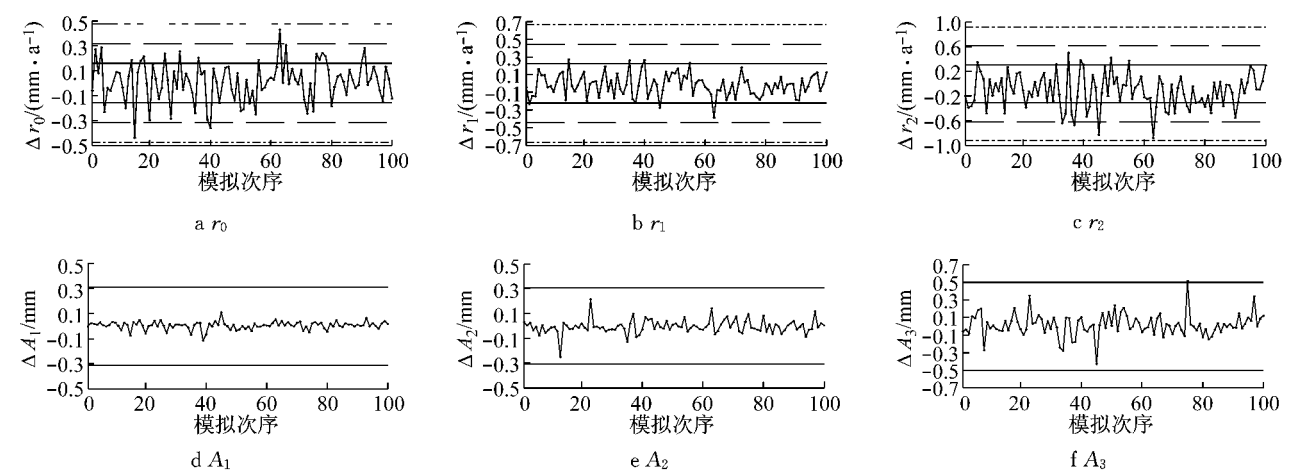


图 3 解算参数 r_0, r_1, r_2, A_1, A_2 和 A_3 的偏差

Fig.3 Biases of parameters r_0, r_1, r_2, A_1, A_2 and A_3

2.2 实测数据

在中国地壳运动观测网络 CMONOC (Crustal Movement Observation Network of China) 提供的区域网中,选择五个基准站(BJSH, KMIN, HRBN, XIAM 和 YANC)的高程方向单日解坐标数据序列进行分析研究。对不考虑速度、振幅变化模型(传统

同时与之对应的拟合效果有了很大的提高,这对后续处理很重要。

此外,为了验证算法的稳定性,在以上模拟试验的基础上进一步设计了如下试验:添加不同噪声水平的高斯白噪声,且每种噪声水平下模拟计算 100 次,探测速度和振幅变化历元,解算模型参数。其探测结果与设定的变化时刻偏差(以 d 为单位)统计结果见表 3。结果表明,随着噪声水平的增加,探测的偏差也会增大。图 3 表示在噪声水平为 10 mm 时,本文模型每次解算参数与参考值的偏差。图中,实线表示参数的 1 倍中误差,虚线表示 2 倍中误差,点划线表示 3 倍中误差。可见 100 次解算的参数与参考值的偏差都在 3 倍中误差之内,即探测的偏差均在误差允许的范围之内,这说明本文提出的算法具有很好的稳定性。

模型)和考虑速度、振幅变化的模型(本文模型)的拟合结果进行对比,如图 4a,5a,6a,7a,8a 所示。其中 T_a 和 T_v 分别表示探测出的年周期振幅和速度变化时刻。图 4b,5b,6b,7b,8b 为对应的传统模型和本文模型拟合后的残差,表 4 列出了解算的模型参数。以 XIAM 站为例,1999.0000—2006.0616 年期间的速

度为 $(-3.13 \pm 0.07) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 2006.0616年之后速度为 $(4.72 \pm 0.07) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 1999.0000—2001.4260年期间的年周期振幅为 $(3.23 \pm 0.42) \text{ mm}$, 2001.4260—2003.7740年期间的年周期振幅为 $(11.68 \pm 0.41) \text{ mm}$, 2003.7740年之后振幅为 $(4.56 \pm 0.40) \text{ mm}$. 由此得出以下结论:

(1) 选取的五个站高程方向都存在明显的速度或振幅变化, 本文算法均能很好地探测出变化时刻, 从而比传统模型更好地反映原始观测数据的趋势和特征.

(2) 对于五个站而言, 传统模型解算的速度估值均偏小, 也不能正确地刻画各站的形变特性. 对于站坐标序列而言, 速度和振幅变化往往反映的是地

震影响, 或者站点区域质量负荷变化等其他非构造因素变化, 因此传统模型不利于分析上述因素对站点的影响.

(3) 本文模型的计算结果表明, 总体上五个站均表现出先下降后上升的趋势, 振幅也出现不同程度的变化, 因此本文模型能够更好地反映序列的细部特性. 以BJSH站为例, 其高程方向在2006.1137年之前表现为下沉, 之后开始上升, 而在2005.2507年前后, 振幅缩减了64%. 这表明影响BJSH站速度和振幅变化的地球物理因素或其他因素在2006年前后发生了很大的变化, 但至于具体变化原因, 有待进一步研究.

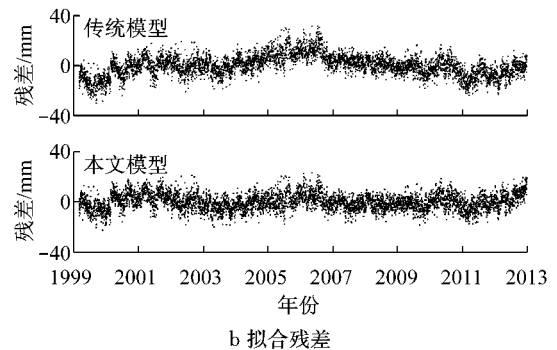
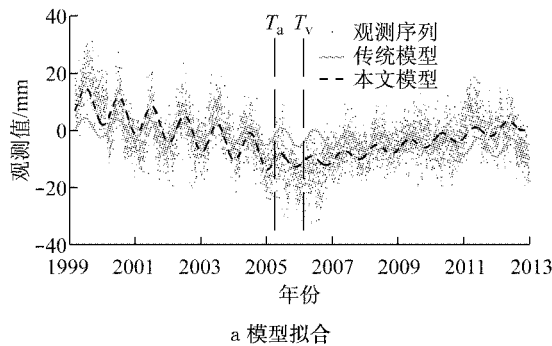


图4 BJSH站模型拟合结果和拟合后残差

Fig.4 Fitting of different models in BJSH and residuals of fitting in BJSH

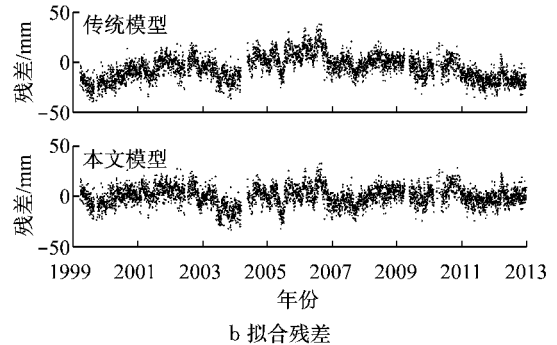
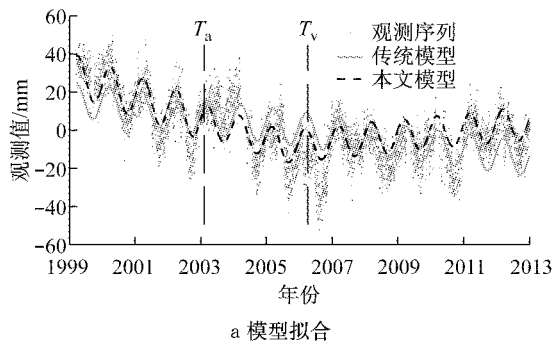


图5 KMIN站模型拟合结果和拟合后残差

Fig.5 Fitting of different models in KMIN and residuals of fitting in KMIN

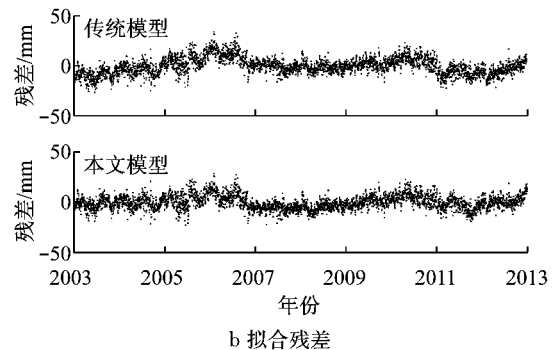
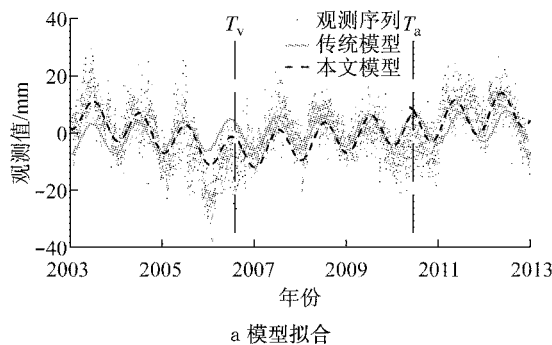


图6 HRBN站模型拟合结果和拟合后残差

Fig.6 Fitting of different models in HRBN and residuals of fitting in HRBN

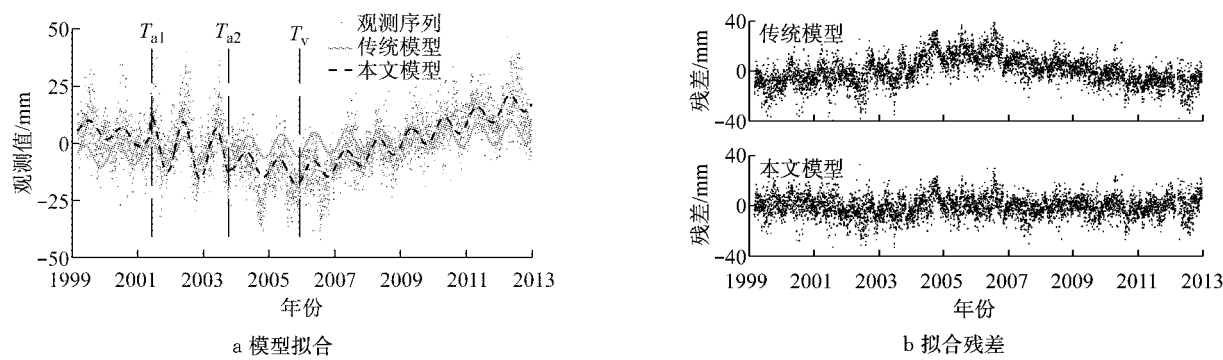


图 7 XIAM 站模型拟合结果和拟合后残差

Fig.7 Fitting of different models in XIAM and residuals of fitting in XIAM

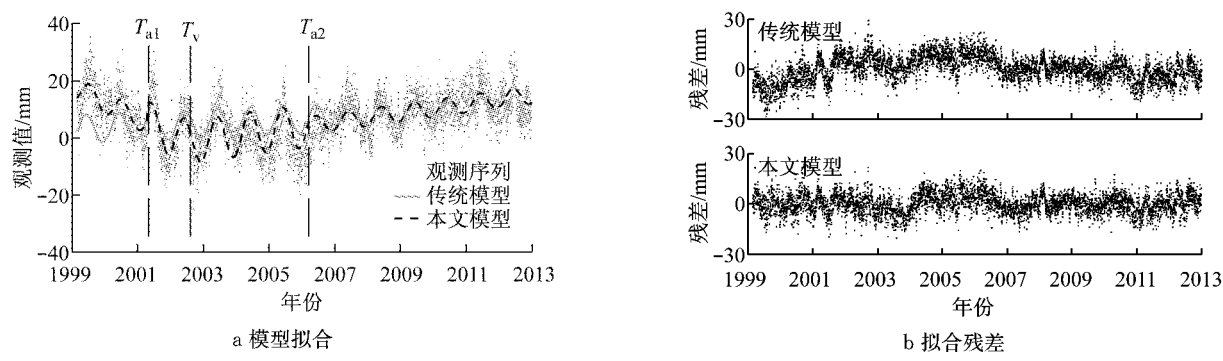


图 8 YANC 站模型拟合结果和拟合后残差

Fig.8 Fitting of different models in YANC and residuals of fitting in YANC

表 4 各站不同模型的解算参数和精度

Tab.4 The parameters of different stations and its accuracy by different fitting models

| 站点 | 计算模型 | 常数项/mm | 速度项 | | 振幅项 | | 拟合效果 | |
|------|------|------------|-----------|--------------------------|-----------|-------------------------|------------|-------|
| | | | 变化时刻/年 | 速度/(mm·a ⁻¹) | 变化时刻/年 | 振幅/mm | χ /mm | R^2 |
| BJSH | 传统模型 | 1.17±0.24 | | -0.57±0.03 | | 3.24±0.17 | 8.50 | 0.20 |
| | 本文模型 | 10.05±0.24 | 2006.1137 | -3.12±0.05 2.02±0.11 | 2005.2507 | 5.54±0.19 2.01±0.17 | 6.50 | 0.54 |
| KMIN | 传统模型 | 15.76±0.36 | | -2.24±0.04 | | 9.05±0.26 | 12.13 | 0.46 |
| | 本文模型 | 28.60±0.36 | 2006.2452 | -5.94±0.07 1.66±0.08 | 2003.4726 | 10.91±0.34 8.53±0.23 | 9.18 | 0.69 |
| HRBN | 传统模型 | -2.60±0.28 | | 0.52±0.05 | | 5.39±0.20 | 8.36 | 0.19 |
| | 本文模型 | 7.20±0.36 | 2006.5795 | -4.16±0.14 2.53±0.07 | 2010.4562 | 5.92±0.19 6.60±0.33 | 7.03 | 0.43 |
| XIAM | 传统模型 | -5.93±0.33 | | 0.78±0.04 | | 5.01±0.23 | 11.52 | 0.14 |
| | 本文模型 | 7.68±0.31 | 2006.0616 | -3.13±0.07 | 2001.4260 | 3.23±0.42 | 8.23 | 0.56 |
| | | | | 4.72±0.07 | 2003.7740 | 4.56±0.40 | | |
| YANC | 传统模型 | 2.74±0.21 | | 0.52±0.03 | | 4.97±0.15 | 7.55 | 0.50 |
| | 本文模型 | 16.40±0.31 | 2002.6205 | -5.32±0.11 | 2001.3466 | 3.99±0.31 | 5.89 | 0.69 |
| | | | | 4.58±0.03 | 2006.2041 | 3.10±0.20 | | |

(4) 本文模型的拟合优度要远大于传统模型，传统模型的残差中依然存在比较明显的模型误差，这会对后续的坐标序列噪声分析等产生不利的影响。

3 结语

本文提出的基于 F 检验探测算法成功探测出模
(下转第 664 页)