

# 顾及有色噪声的 GPS 位置时间序列中断探测法

明 锋<sup>1, 2</sup> 杨元喜<sup>2</sup> 曾安敏<sup>2, 3</sup> 景一帆<sup>4</sup>

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

3 西安测绘研究所,陕西 西安,710054

4 信息工程大学导航与空天目标学院,河南 郑州,450001

**摘要:**GPS 位置时间序列中经常会出现信息中断,造成数据不连续,进而导致测站速度及其不确定度的估计有偏。因此,时间序列中断探测是动态大地测量数据处理的重要内容。在基于  $t$ -检验的序贯格局转换分析法(sequential  $t$ -test analysis of regime shifts, STARS)算法的基础上,顾及 GPS 位置时间序列的噪声特性,提出了一种考虑有色噪声的 STARS 算法(COL-STARS)。该算法首先利用一阶自回归模型(auto-regressive, AR(1))模型进行噪声“白化”,然后再进行数据中断探测。经模拟数据和实测数据分析,改进后的 COL-STARS 算法在一定程度上降低了中断探测的误判,能提高 GPS 位置时间序列中断探测的准确率。同时,也对 STARS 算法的参数设置以及滤波对中断探测的影响分别进行了讨论。

**关键词:**GPS 位置时间序列; 中断; 有色噪声; AR(1)模型;  $t$ -检验

中图法分类号:P227

文献标志码:A

GPS 位置时间序列中断指由于接收机故障、天线更换、地震、框架变换、数据解算时分析策略和模型的改变以及其他一些未知外界环境的影响,导致数据中断<sup>[1, 2]</sup>,即在某一时刻发生突然的且对其后序列均产生持续影响的跳跃。

由接收机故障、更换天线、地震等因素导致的中断可以通过测站观测日志确定,而由于框架变换、解算策略和模型的变化导致的中断则可以通过 GPS 数据重处理而消除,但是重处理后的时间序列中仍存在未知原因导致的中断。Santamaría 对全球 GPS 数据再处理的分析表明 26% 的中断来源不明<sup>[3]</sup>。Gazeaux 对 Scripps 轨道和永久阵列中心(Scripps Orbit and Permanent Array Center, SOPAC)解算的 GPS 位置时间序列进行了分析,发现仍有三分之一未知原因的中断,且其大小比其他已知原因的中断要小<sup>[4]</sup>。GPS 位置时间序列中的中断影响测站的稳定性,使测站速度及不确定度估计有偏,在 IGS 测站稳定性分析<sup>[5]</sup>、地壳形变、建立全球或局部参考框架时都必须对其进行建模以消除不利影响<sup>[6]</sup>。

目前,已有多位学者研究了 GPS 位置时间序

列中的中断探测算法。Williams 分析了 GPS 位置时间序列中的中断特性,利用离线的变化点探测算法进行中断探测<sup>[4]</sup>,该方法算法简单,但其假设数据序列服从正态分布,这种假设并不符合实际。Perfetti 利用 DIA (detection identification adaptation) 技术对意大利 GPS 基准网位置时间序列进行了中断探测,结果表明大约 70% 的中断能够被探测出来<sup>[7]</sup>。DIA 技术同样基于正态分布假设,且每次只能检测一个中断,搜索一般从第一个历元开始,当时间序列跨度较大时,计算非常耗时。Vitti 引入图像分段中的分段平滑函数进行中断探测,该算法理论和实现都较复杂<sup>[8]</sup>。Gazeaux 对第一次 GPS 中断探测实验(detection offsets in GPS experiment, DOGEx)中各参与者提交的探测方法和探测效果进行了分析比较,结果表明,探测正确率高的方法其误判率也高,而探测正确率低的方法其误判率也低<sup>[4]</sup>。

本文基于序贯中断探测方法<sup>[9]</sup>,顾及 GPS 位置时间序列中的有色噪声的影响,利用一阶自回归(auto-regressive, AR(1))模型对有色噪声进行建模,滤波后得到“近似”正态分布的白噪声序列,在

此基础上利用序贯中断算法(sequential t-test analysis of regime shifts, STARS)进行数据中断探测。

## 1 序贯中断算法—STARS

STARS 算法基础是数理统计中的  $t$ -检验理论<sup>[10]</sup>。下面简单介绍该算法,并将其引入到 GPS 位置时间序列中断探测中。

设 GPS 位置时间序列某一分量  $\{X_t, t = 1, 2, \dots, n\}$  可以用以下模型来描述:

$$X_t = d_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

式中,  $d_t$  为各趋势项之和(包括线性的和周期性的);  $\varepsilon_t$  为不规则分量, 满足正态分布  $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$ , 其中方差  $\sigma^2$  未知。若  $c$  历元时刻发生中断, 则:

$$d_t = \begin{cases} \mu_1, & t = 1, 2, \dots, c-1 \\ \mu_2, & t = c, c+1, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\mu_1, \mu_2$  分别为中断前、后的趋势项之和。

若某一历元  $c$  时刻发生中断, 则认为历元  $c$  前后的序列趋势发生变化也即样本均值发生改变, 而样本方差不变。计算其前后样本均值的差异, 在给定的显著性水平下, 利用统计量  $T$  进行双边检验就可以判断在历元  $c$  时刻是否发生中断。

在 STARS 算法中, 需要先设置截断长度  $l$  和显著性水平  $p$ , 其中  $l$  为滑动探测窗口长度, 其对中断探测的影响将在后面进一步讨论。设历元  $c$  前后两个长度为  $l$  的样本均值  $\bar{x}_{\text{old}}, \bar{x}_{\text{new}}$ , 则根据  $t$ -检验理论, 可以构造如下统计量  $T$ :

$$T = \frac{\bar{x}_{\text{old}} - \bar{x}_{\text{new}}}{\sqrt{2\sigma_l^2/l}} \sim t(2l-2) \quad (3)$$

式中,  $t$  为自由度为  $2l-2$  的  $t$  分布;  $\sigma_l^2$  为 GPS 位置序列中长度为  $l$  的修正样本方差。根据式(3), 在显著性水平  $p$  下, 利用统计量  $T$  就可进行假设检验, 零假设和备选假设为  $H_0$ ( $c$  时刻发生中断)、 $H_1$ ( $c$  时刻没有发生中断);  $c$  时刻之后的坐标用来计算中断发生指标(regime shift index, RSI), 简称  $I_c$ , 即:

$$I_c = \sum_{i=c}^{c+m} x_i^*/(\sigma_l) \quad (4)$$

式中,  $x_i^*$  为正则化偏差<sup>[7]</sup>;  $m = 0, \dots, l-1$ 。显然, 在  $H_0$  为真时,  $I_c$  即为  $c$  至  $c+l-1$  时刻观测值正则化偏差的累计之和。若  $I_c < 0$ , 表明没有发生中断, 且将  $I_c$  重置为 0, 再向后搜索; 若  $I_c > 0$ , 则表明  $c$  时刻在显著性水平  $p$  下发生中断。重复上述过程即可完成对所有序列的检验, 因此, 该方法称之为序贯探测算法。在所有中断探测完毕之后, 就可以利用式(2)计算中断的大小。具体步骤

可以参考 Rodionov 的序贯算法<sup>[9]</sup>。

## 2 顾及有色噪声的中断序贯算法—COL-STARS

国内外已有很多学者证实不论是全球尺度还是区域尺度的 GPS 位置时间序列中均包含有色噪声<sup>[11-14]</sup>。GPS 位置时间序列在时域上存在相关性, 其相关性与噪声类型有关。因而, 式(1)中正态分布假设不再成立。若不去除有色噪声则会影响 STARS 的探测效果。另外, 由于幂律噪声在一定时间间隔内也会表现出线性趋势, 其非线性变化导致的突变很容易被误认为是中断<sup>[15]</sup>, 从而造成“误判”。基于以上两点原因, 在应用 STARS 算法之前需对 GPS 位置时间序列进行“白化”。

由于 GPS 位置时间序列中的有色噪声大部分为非平稳过程, 在时域上描述此类随机过程存在较大困难。因此, 一般先将其平稳化之后, 再对有色噪声建模<sup>[16]</sup>。Amiri-Simkooei 研究表明, 在移去 10 个谐波之后, GPS 位置时间序列的相关性在几天之内呈指数形式减小, 该特性可以用 AR(1)模型来描述<sup>[17]</sup>。根据 Amiri-Simkooei 的研究结果, 本文用 AR(1)模型来对有色噪声进行建模。

AR(1)时间序列数学模型为:

$$X_t - \mu = \rho(X_{t-1} - \mu) + \varepsilon_t \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为模型系数。令  $d'_t = d_t - \rho d_{t-1}$ , 则式(5)为:

$$X_t = \rho X_{t-1} + d'_t + \varepsilon_t \quad (6)$$

改进后的 COL-STARS 算法首先利用人工检视法探测明显的中断, 据此将 GPS 位置时间序列划分为若干部分, 对各部分去趋势和周年信号(以下均简称“去趋势”)后, 再利用最大似然估计法估计  $\rho$ , 经 AR(1)滤波后再利用 STARS 算法进行中断探测。

采用分段探测的主要原因是为了避免 AR(1)模型系数  $\rho$  估计有偏, 因为 GPS 位置时间序列的噪声特性与观测时段相关<sup>[18]</sup>, 而且这样能尽力避免由于中断造成偏差。同时, 若分段后的位置序列时间跨度较短, 对  $\rho$  估计同样也会产生不利影响。因此, 划分时需考虑 GPS 位置时间序列的具体特点。

## 3 算例与分析

### 3.1 探测结果

为了验证本文提出的改进算法 COL-

STARS 的探测效果,本文首先采用 DOGE<sub>x</sub> 中的 DPCF 测站模拟数据,其高程分量时间序列如图 1 所示。为了使试验更专注于中断探测,数据中没有模拟粗差。

同时,采用实测数据对本文算法进行了验证。

数据来源于 SOPAC 提供的剔除粗差后的 BLYT 站位置时间序列,时间跨度为 1994. 0370~2013. 6644,如图 2 所示。SOPAC 也提供了中断探测结果,可以用来进行对比验证。

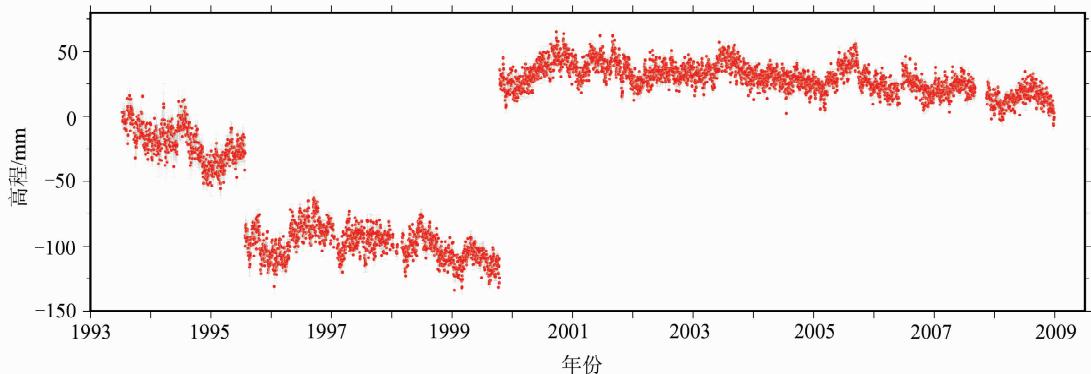


图 1 测站 DPCF 高程时间序列

Fig. 1 Time Series of Station DPCF (Up Component)

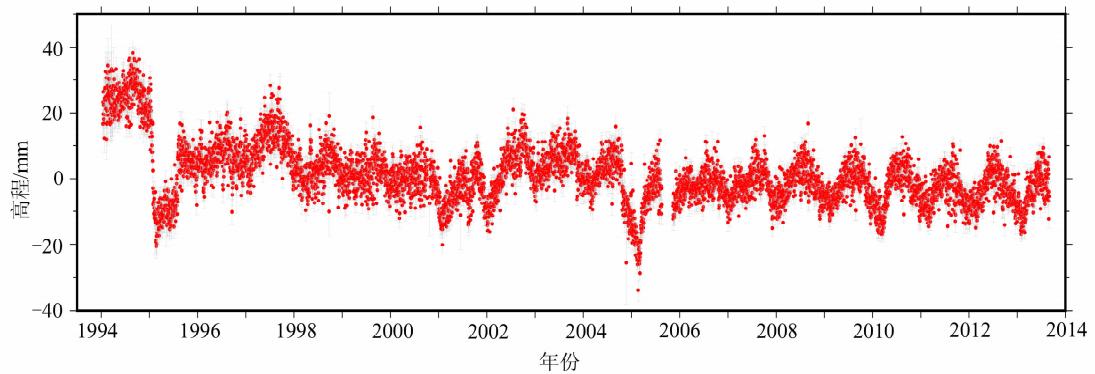


图 2 测站 BLYT 高程时间序列

Fig. 2 Time Series of Station BLYT (Up Component)

从图 1 可以看出,DPCF 站高程方向上在 1995. 5、2000. 0 时刻附近有 2 个明显的中断;从图 2 可以看出,BLYT 站高程方向在历元 1995. 0、1995. 5 时刻附近有 2 个间隔较短的连续中断。

根据上述初步的“人工诊断”信息,经进一步的数据检查,各测站数据划分如表 1 所示,计算得到的 AR(1) 模型系数也一并列于表中。

表 1 DPCF 站和 BLYT 站数据划分方案及 AR(1) 模型系数

Tab. 1 Scheme of Data Dividing and AR(1) Model Coefficient of Station DPCF and BLYT

测站	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
DPCF	1993. 5250~1995. 5647 $\rho=0.467\ 11$	1995. 5674~1999. 7864 $\rho=0.734\ 49$	1999. 7919~2008. 9911 $\rho=0.710\ 12$
BLYT	1994. 0370~1995. 9986 $\rho=0.498\ 86$	1996. 0014~1999. 9986 $\rho=0.627\ 38$	2000. 0014~2013. 6644

从表 1 可以看出,各分段数据中 AR(1) 模型系数  $\rho$  均满足  $0 < \rho < 1$ ,表明模拟数据和实测数据经去趋势后的残差均具有“红谱”的特性,也即表明各 GPS 位置时间序列均含有有色噪声。由于测站 BLYT 在历元 1995. 0 附近发生中断,导致 *a* 段

划分的跨度太短。因此,本文不作考虑。

本文分别采用 STARS 算法和改进的 COL-STARS 算法对上述 2 测站进行中断探测。DPCF 站和 BLYT 站中断发生历元和对应的 RSI 分别列于表 2~表 5。表 2、表 3 中的“Y”表示真

实的中断，“N”表示虚假的中断。表4、表5中的“SOPAC”表示由SOPAC探测到的中断历年。

图3为BLYT测站COL-STARS算法和SOPAC的中断对比结果。

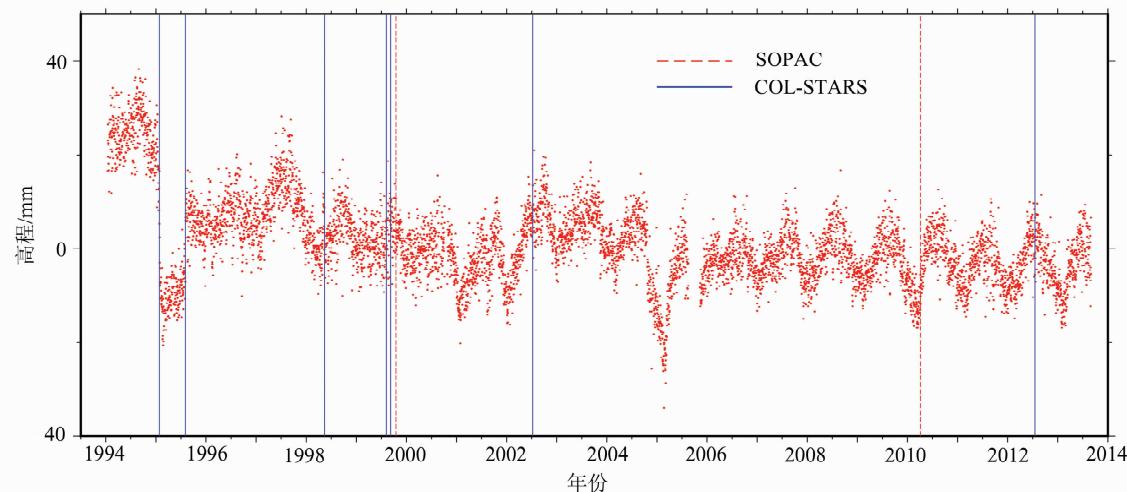


图3 BLYT测站AR(1)滤波后COL-STARS和SOPAC中断探测结果( $l=8, p=0.005$ )

Fig. 3 Offset Detection Results of COL-STARS Method After AR(1) Filtering in Station BLYT ( $l=8, p=0.005$ )

由§2可知,  $p$ 不变,  $l$ 增大, 则自由度 $2l-2$ 也增大, 意味着连续两个中断之间平均值的显著性差异(在显著水平 $p$ 条件下)随之减小, 而 $l$ 个历年(RSI变大的可能性增大(见公式(4)), 此时探测出来的中断将会增多, 也即出现“虚警”; 若减小 $l$ ,  $p$ 不变, 则自由度 $2l-2$ 减小, 显著性差异增加, 而 $l$ 个历年(RSI的值可能变小, 这就意味着一些跳跃数值较小的中断可能无法被探测出来, 也即出现“漏警”。同理, 当 $l$ 不变,  $p$ 增大, 则会出现“虚警”, 减小 $p$ 则会出现“漏警”。

表2 DPCF测站STARS算法中断探测结果(Up)

Tab. 2 Offset Detection Results of STARS Method in Station DPCF (Up)

参数	历年	RSI	Y/N
$l=5, p=0.001$	1995.5674	7.637 352 81	Y
	1997.3032	0.047 035 52	N
	1999.7919	22.199 791 18	Y
	1994.0151	0.1533104 5	N
	1995.5674	7.498 461 57	Y
	1995.8193	0.859 345 57	N
	1996.6297	0.569 837 98	N
	1997.3032	0.209 550 19	N
	1997.5496	0.479 151 89	Y
	1999.7919	21.305 256 03	N
$l=8, p=0.0005$	2001.8453	0.318 058 98	N
	2005.4018	0.479 650 98	N

表3 DPCF测站COL-STARS算法中断探测结果(Up)

Tab. 3 Offset Detection Results of COL-STARS Method in Station DPCF (Up)

参数	历年	RSI	Y/N
$l=5, p=0.001$	1995.5674	5.613 658 18	Y
	1999.7919	18.374 444 62	Y
$l=10, p=0.0005$	1995.5674	6.457 362 01	Y
	1999.7919	19.194 028 97	Y

表4 BLYT测站STARS算法中断探测结果(Up)

Tab. 4 Offset Detection Results of STARS Method in Station BLYT (Up)

参数	STARS		SOPAC
	历年	RSI	历年
$l=8, p=0.0005$	1995.0753	2.742 160 52	1995.0699
	1995.5904	1.411 739 93	1995.5877
	1998.3384	0.329 664 52	1998.3658
	2000.6161	0.170 900 99	1999.7904 *
	2004.8074	1.025 031 01	2010.2589
	1995.0753	3.364 312 64	1995.0699
	1995.5904	1.922 350 93	1995.5877
	1998.3384	0.346 512 69	1998.3658
	2000.6161	0.256 703 86	1999.7904 *
	2004.8074	1.350 586 61	
$l=10, p=0.0005$	2009.9521	0.162 432 47	2010.2589
	2011.7000	0.342 607 96	
	2012.6981	0.109 439 68	

注: \* 表示 BLYT 坐标时间序列中没有 1999.7904 历元的数据。

表5 BLYT测站COL-STARS算法中断探测结果(Up)

Tab. 5 Offset Detection Results of COL-STARS Method in Station BLYT (Up)

参数	COL-STARS		SOPAC
	历年	RSI	历年
$l=5, p=0.01$	1995.0699	0.342 880 31	1995.0699
	1995.5877	0.478 555 67	1995.5877
	1998.3685	0.739 913 38	1998.3658
	1999.5986	0.241 517 41	1999.7904 *
	2002.5192	0.004 600 39	2010.2589
$l=8, p=0.005$	1995.0699	0.152 943 74	1995.0699
	1995.5877	0.243 251 86	1995.5877
	1998.3685	0.765 768 44	1998.3658
	1999.5986	0.149 671 52	
	1999.6836	0.156 840 87	1999.7904 *
$l=10, p=0.0005$	2002.5192	0.298 125 19	
	2012.5451	0.042 279 49	2010.2589

注: \* 表示 BLYT 坐标时间序列中没有 1999.7904 历元的数据。

### 3.2 参数设置对中断探测的影响

从表 2 至表 4 可以看出,RSI 值是接受或拒绝历元  $c$  时刻是否为中断的关键,而 RSI 值又由滑动窗口长度  $l$  和显著水平  $p$  决定。由表 2 可知,在  $l=5, p=0.0005$  时,能够探测出 2 个正确的中断,但同时也探测出了一个“虚假的”中断(1997.3032);而当  $l=8, p=0.0005$  时,则探测出了更多“虚假的”中断。对于 BLYT 测站,由表 4 可以看出,当  $p=0.0005$  时,由 8 增加到 10,探测到的中断个数也由 5 增加到 8。

由此可知,合理选择截止滑动窗口长度  $l$  和显著性水平  $p$  是能否尽可能减少“虚警”率和“漏警”率,提高中断探测正确率的关键。因此,在探测之前需设置不同的滑动窗口进行多次实验,以确定最优的参数。

### 3.3 滤波对中断探测的影响以及与 SOPAC 结果的比较

由于 DPCF 测站的中断历元已知,因而根据 DPCF 测站的探测结果就可以对比滤波前后两种算法的探测效果。从表 2 中可知,未滤波前探测出了虚假的中断,特别是当截止窗口和显著性水平都增大后,虚假的中断数目显著地增加了(由 1 增加到 7),其原因 §3.2 已作分析。从表 3 可以看出,经 AR(1)滤波后在不同参数设置情况下均能探测出正确的中断。

如引言中所述,已有的实验中均没有顾及 GPS 位置时间序列的噪声特性,是其误判率或漏判率较高的可能原因之一。因此,对 GPS 位置时间序列进行滤波,去除有色噪声的影响,在一定程度上能够提高中断探测的可靠性。虽然滤波对中断探测的影响需要更多观测样本验证分析,但本文的结果表明考虑了有色噪声的 COL-STARS 算法能在一定程度上降低“虚警”率。

通过对比 COL-STARS 算法和 SOPAC 对 BLYT 站的探测结果,可以说明 COL-STARS 算法的有效性。从表 5 可以看出,相对于表 4 的结果,滤波后前 3 个探测到的中断历元与 SOPAC 的结果一致,但 COL-STARS 算法探测出了更多的中断。特别是当  $l=8, p=0.005$  时,COL-STARS 算法探测出了 7 个中断,而 SOPAC 只有 4 个(见图 3)。从图 3 中可以看出,当中断跳跃值较大时,COL-STARS 和 SOPAC 结果一致,但当中断跳跃值较小时,两者结果有明显差异。相对于 SOPAC 的结果,COL-STARS 算法探测到了

历元 2002.5192 时刻的一个明显中断,但是没有探测出历元 2010.2589 时刻的中断。

虽然经过 AR(1)滤波后能够提高探测正确率,但由于 AR(1)时间序列模型仅能消除一部分高频噪声,剩余的低频噪声仍残留在 GPS 位置时间序列中。为了提高 GPS 位置时间序列的“白化”效果,需要对各种频段的有色噪声建模,以消除其影响。然而,由于本文所选测站的时间跨度较短,尚不能完全分离出低频有色噪声。

## 4 结语

GPS 时间序列中包含各种已知和未知原因造成的中断,若不将其剔除则会导致不正确的速度和速度误差的估计,进而影响地壳形变、应变信号的统计显著性。本文结合 GPS 位置时间序列的噪声特性和数据特点,引入 STARS 中断探测算法,并对其进行了相应改进,提出了改进后的 COL-STARS 算法。与“假设驱动”法相比,该算法属于“数据驱动”方法,且实现简单、计算量小,更符合 GPS 位置时间序列的实际。同时,当 GPS 位置时间序列存在数据缺失时,本文提出的分段估计也能处理该情况。

由于 STARS 算法基于正态分布假设,本文基于 GPS 位置时间序列的噪声特点,先将其“白化”,然后再利用 STARS 算法进行中断探测,一定程度上降低了“误判率”。

还需要指出的是,本文提出的中断算法中,滑动窗口  $l$  和显著水平  $p$  是能否正确探测中断的关键。当不能与外部探测结果进行对比时,可采取以下两种方法进行结果判定:一是根据测站提供的一些先验信息,如“元数据”(或测站观测日志)等文件给出的“观测事件”记录进行比较。这些“观测事件”如地震、仪器更换等会导致明显的中断,本文给出的参数应该能探测出这些历元的中断,否则就需再进一步调整,直至能探测出这些已知的中断为止。二是与根据人工检视法的结果进行对比。人工检视法的正确性较高,因而可以将该结果作为参数设置的依据,不足的是人工法耗时费力且效率较低。

本文算法仍需进一步的改进。首先,STARS 算法不适用于变化缓慢的中断;其次,本文利用 AR(1)模型对有色噪声建模,在存在中断的情况下,如何无偏地估计模型系数仍需进一步的研究;最后,本文没有考虑粗差对中断探测的影响。事实上,当 GPS 位置时间序列中同时含有有色噪声

和粗差时将会使中断探测更趋复杂。对此有两种方案:一是在中断探测前,基于一定的准则识别并剔除粗差;二是利用抗差估计减弱其影响<sup>[19]</sup>。这将是下一步的研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] Kenyeres A, Bruyninx C. EPN Coordinate Time Series Monitoring for Reference Frame Maintenance [J]. *GPS Solutions*, 2004, 8(4): 200-209
- [2] Williams S D P. Offsets in Global Positioning System Time Series[J]. *J Geophys Res*, 2003, DOI: 10.1029/2002JB002156
- [3] Santamaría-Gómez A. Estimation of Crustal Vertical Movements with GPS in a Geocentric Frame, within the Framework of the TIGA Project [D]. Paris: Laboratoire de Recherche en Géodésie (LAREG) of the Institut Géographique National (IGN), 2010
- [4] Julien Gazeaux, Simon Williams, Matt King, et al. Detecting Offsets in GPS Time Series: First Results from the Detection of Offsets in GPS Experiment [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(5): 2 397-2 407.
- [5] Yao Yibin, Shi Chuang. On Non-linear Motion of IGS Station[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(5): 423-426 (姚宜斌, 施闯. IGS测站的非线性变化研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(5): 423-426)
- [6] Jiang Weiping, Li Zhao, Liu Wanke, et al. Some Thoughts on Establishment and Maintenance of Terrestrial Reference Frame Considering Non-linear Variation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 665-669 (姜卫平, 李昭, 刘万科, 等. 顾及非线性变化的地球参考框架建立与维持的思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(6): 665-669)
- [7] Perfetti N. Detection of Station Coordinate Discontinuities within the Italian GPS Fiducial Network [J]. *J Geophys Res*, 2006, 80(7): 381-396
- [8] Vitti A. Sigseg: A Tool for the Detection of Position and Velocity Discontinuities in Geodetic Time-Series[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(3): 405-410
- [9] Rodionov S N. A Sequential Algorithm for Testing Climate Regime Shifts [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31 (9): L09204, DOI: 10.1029/2004GL019448
- [10] Zhuang Chuqiang, He Chunxiong. Mathematical Statistics Foundation [M]. 3rd Edition, Guang-Zhou: South China University of Technology Press, 2006 (庄楚强, 何春雄. 应用数理统计基础(第三版) [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006)
- [11] Williams S D P, Bock Y, Fang P, et al. Error Analysis of Continuous GPS Position Time Series[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109(B3), B03412, DOI: 10.1029/2003JB002741
- [12] Li Zhao, Jiang Weiping, Liu Hongfei, et al. Noise Model Establishement and Analysis of IGS Reference Station Coordinate Time Seriesinside China[J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41 (4): 496-503 (李昭, 姜卫平, 刘鸿飞, 等. 中国区域IGS基准站坐标时间序列噪声模型建立与分析[J]. 测绘学报, 2012, 41(4): 496-503)
- [13] Wang Wei, Zhao Bin, Wang Qi, et al. Noise Analysis of Continuous GPS Coordinate Time Series for CMONOC[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(5): 943-956
- [14] Huang Liren, Fu Yang. Analysis on the Noise from Continuously Monitoring GPS Sites[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 20(2): 197-202 (黄立人, 符养. GPS连续观测站的噪声分析[J]. 地震学报, 2007, 20(2): 197-202)
- [15] Gambis D. Allan Variance in Earth Rotation Time Series Analysis[J]. *Advances in Space Research*, 2002, 30(2): 207-212
- [16] Bos M S, Fernandes R M S, Williams S D P, et al. Fast Error Analysis of Continuous GPS Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(3): 157-166
- [17] Amiri-Simkooei A R, Tiberius C C J M, Teunissen P J G. Assessment of Noise in GPS Coordinate Time Series: Methodology and Results[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112(B7), B07413, DOI: 10.1029/2006JB004913
- [18] Santamaría-Gómez A, Bouin M-N, Collilieux X, et al. Correlated Errors in GPS Position Time Series: Implications for Velocity Estimates[J]. *J Geophys Res*, 2011, 116(B1): 384-398, B01405, DOI: 10.1029/2010JB007701
- [19] Yang Yuanxi. Some Numerical Prediction Methods for the Wind Speed in the Sea Based on ERS-1 Scatterometer Wind Data[J]. *Survey Review*, 2001, 36 (280): 121-131

## Offset Detection in GPS Position Time Series with Colored Noise

MING Feng<sup>1, 2</sup> YANG Yuanxi<sup>2</sup> ZENG Anmin<sup>2, 3</sup> JING Yifan<sup>4</sup>

1 Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China

3 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

4 Institute of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

**Abstract:** Offsets in GPS position time series often lead discontinuities in deformation analysis. The estimation of geodetic station velocities and their uncertainties will be biased if the offsets are not modeled. The detection and correction of offsets are fundamental steps in pre-processing of GPS position time series in dynamic geodetic studies. In this paper, based on the Sequential *t*-Test Analysis of Regime Shifts (STARS) algorithm, we propose a colored modified method called COL-STARS to detect offsets considering the noise characteristics of GPS position time series. We first use an AR(1) model to whiten the original GPS position time series, then the STARS method is applied to detect the offsets. Simulated and real examples show that the COL-STARS algorithm can reduce the ratio of miss-identification of the offsets somewhat, and can be used for offset detection and correction. The impact of parameters setting and filtering on the offsets detection is also discussed.

**Key words:** GPS position time series; offset; colored noise; AR(1) model; *t*-test

**First author:** MING Feng, PhD candidate, specializes in the dynamic geodetic data processing, E-mail: geodesy\_xd@163.com

**Foundation support:** The National High-Tech R&D Program of China (863 Program), No. 2013AA122501; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41374019, 41020144004, 41474015; the Open Fund of State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, No. SKLGIE2015-Z-1-1.