

文章编号:1671-8860(2007)01-0039-04

文献标志码:A

# GPS 周跳探测及修复的小波变换法

蔡昌盛<sup>1,2</sup> 高井祥<sup>1</sup>

(1 中国矿业大学环境与测绘学院,徐州市泉山区翟山,221008)

(2 辽宁工程技术大学地理空间信息技术与应用实验室,阜新市中华路47号,123000)

**摘要:**利用小波分析方法对常用的GPS周跳检测量进行了周跳探测,获得了小波方法所能探测到的最小周跳值,并与高次差法进行了对比,提出了利用小波变换探测出周跳后如何直接进行周跳修复的方法。计算结果表明,该方法是可行的。

**关键词:**GPS;周跳;小波变换;高次差法

**中图法分类号:**P228.41

周跳的探测和修复是载波相位测量中的重要问题<sup>[1]</sup>。在精密定位中,周跳的探测和修复是必须的。一种特别适合于动态数据处理的周跳探测和修复方法是卡尔曼滤波法,该方法通过对预报值和实测值的比较来判断周跳,但该方法需要设置合适的滤波参数。自从 Collin 等人<sup>[2]</sup>提出利用小波方法探测周跳后,小波方法就成为人们研究的热点<sup>[3-5]</sup>。通常的做法是利用小波方法探测周跳,然后辅助其他方法来修复周跳,这无疑增加了修复周跳的难度。本文对利用小波方法探测周跳作了进一步探讨,并提出了利用小波变换发现周跳后,如何进一步修复周跳的方法。

## 1 周跳探测的小波变换方法

小波变换是一种信号的时频分析方法,它具有多分辨率分析的特点,而且在时频两域都具有表征信号局部特征的能力。在低频部分,具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率;在高频部分,具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,所以被誉为数学显微镜<sup>[6]</sup>。二进小波对信号的分析具有变焦距的作用。如果想观看信号更小的细节内容,就需要增加放大倍数;反之,若想了解信号更粗的内容,则可以减小放大倍数。用于周跳

检测的观测量可以看作随时间变化的一种信号,它所包含的各类偏差项是分布在不同频率上的信号成分。利用小波方法探测周跳实际上是通过一定尺度上的带通滤波器对信号进行滤波,将包括周跳在内的特定频率成分提取出来。发生周跳的位置可以看成信号中的奇异点,根据信号奇异性检测原理,在周跳出现时,其小波变换后的系数具有模量极大值,因而通过对模量极大值点的检测来确定周跳发生的时间。

## 2 周跳探测

GPS 周跳检测量通常采用非差相位、伪距与相位组合、电离层残差和双差相位观测量。非差相位观测量中含有若干与时间相关的项,它们会妨碍周跳的探测。伪距与相位组合观测量仅与电离层影响有关,而电离层变化是很缓慢的,因此,该观测量是比较理想的周跳检测量。电离层残差法容易探测出小周跳,但要确定周跳发生在哪个频率上,还需进一步分析。双差相位观测量可以消除与卫星和接收机有关的载波相位及其钟差项,因此,该观测量具有较好的平滑性,是理想的周跳检测量。

利用中国地壳运动观测网络 BJFS 和 BJSH

收稿日期:2006-10-28。

项目来源:辽宁工程技术大学地理空间信息技术与应用实验室基金资助项目(2005010,2004011);中国矿业大学青年科研基金资助项目(2005A031);中国矿业大学科技基金资助项目(2005B020)。

两个测站的观测资料,提取了上述四种观测量序列,采样率是30 s,共提取了90个历元的观测数据,测站间距为76 km。数据序列经检测不含周跳。为了检验小波方法探测周跳的分辨能力,对四种观测量序列在第45个历元处分别加入不同数量的周跳。在小波分析中,采用Daubechies(dbN)小波系中的db6小波基对信号进行单尺度分解,然后利用单尺度分解的高频系数来重构,利用重构信号或者直接利用高频系数来探测周跳,当周跳发生时,出现模量极大值。经多次探测试验,获得了小波方法能探测到的最小周跳。采用下面的标准判断是否发生周跳:首先计算重构数据序列的平均值和中误差,如果该数据序列中有一数值与均值之差的绝对值大于4倍的中误差(置信度为99.99%),则认为发生周跳。小波方法能探测到的最小周跳见表1。

表1 小波方法能探测到的最小周跳

Tab. 1 Minimum Cycle Slips Detected by Wavelets

观测值 类型	非差 相位	粗码相 位组合	精码相位 组合	电离层 残差	双差 相位
分辨率/周	40	1	1	1	1

图1为探测到最小周跳时的小波变换图。为了客观地评价小波方法探测周跳的能力,利用高次差法对同样的数据进行了探测。用高次差法探测周跳的原理实际上也是对信号的高通滤波。经计算发现,小波方法所能探测出的周跳用高次差法同样能够探测出来。图2为含1周周跳的双差数据序列4次差后的情况。由于多次求差后,数据序列的长度发生了变化,从高次差后的数据序列里不能直接判断周跳在原始信号中的具体位置。由此可以看出,小波方法探测周跳在分辨率上并不占优势,它的优势在于定位准确。对于非差相位观测值,由于受多种误差的影响,只能探测到几十周的大周跳,而对于电离层残差观测值,从

原始信号中就能明显看出周跳,利用其他手段对其进行探测意义不大。对于相位与测码伪距组合观测值,不同接收机所得到的伪距的噪声水平不同,探测能力会有几周的差异。对于双差相位观测量,为了探求周跳探测能力是否与测站间距有关,笔者计算了BJFS和LHAS两个测站组成的双差观测数据,基线距离约为2 500 km,利用小波方法仍然能探测到1周的周跳。

为了试验小波方法对短时间内频繁周跳的检测效果,在双差观测数据第45历元和50历元处分别加入1周的周跳,小波变换法的探测情况如图3(a)所示。可以看出,尽管两次周跳引起的突变有部分重叠,但还是能够区分,两个极小值分别对应发生周跳的历元。图3(b)为在第45历元和53历元处加入周跳的情况,两次周跳间隔8历元后,突变部分已经没有了重叠,两次周跳的分辨更加明显。

### 3 周跳修复

在周跳探测阶段,对信号进行单尺度或多尺度分析,在信号出现突变时,其小波变换后的系数具有模量极大值,通常通过对高频系数或者对高频重构信号的检测来发现并确定周跳发生的位置。利用小波变换探测出周跳后,探测信号的奇异值并不能代表周跳的大小,因而不能直接对周跳进行修复。对周跳进行修复可经过以下几个步骤来进行:①对原始信号进行小波变换,提取高频系数;②对高频系数奇异值进行插值替换;③替换后,与低频系数一起进行合成重构;④重构结果与原始信号相减,获得周跳发生位置处的差值;⑤对该差值进行取整,有小数的进一位,利用该值对原始信号进行修复。重复以上步骤,直到不能发现周跳,则修复完成。

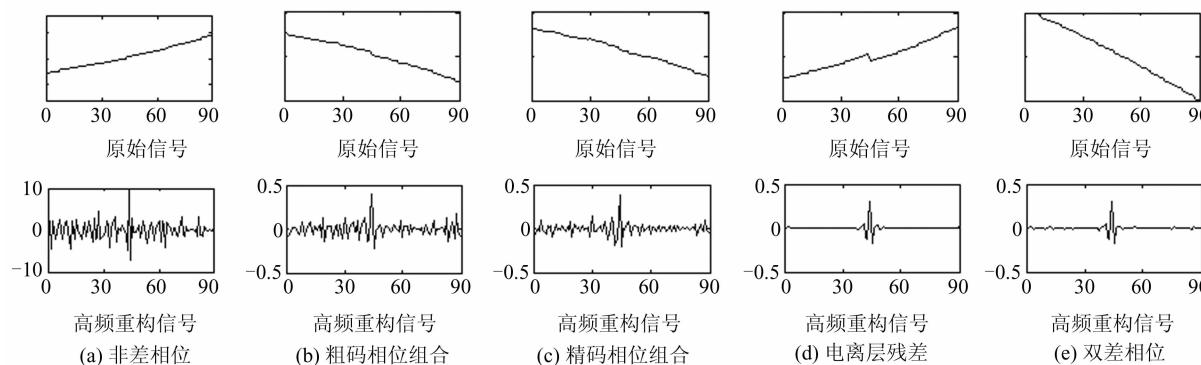


图1 不同观测量含周跳时的小波变换

Fig. 1 Wavelet Transform of Different Observations for Cycle Slip Detection

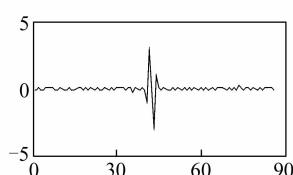


图 2 含 1 周周跳双差序列的 4 次差

Fig. 2 Four Order Time Differences for Double-difference Data with 1 Cycle Slip

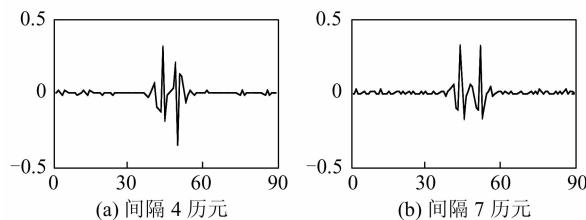


图 3 两次发生周跳时的小波变换

Fig. 3 Wavelet Transform of Cycle Slip Occurring Twice

按照上述步骤,对含有 1 周周跳的双差观测序列进行计算,利用小波方法进行 2 尺度分解,获得了两个层的高频系数,见图 4。首先对第一层高频系数的奇异值进行插值替换,结果见表 2,插值结果的大小应与非奇异值相当,经重构后,获得与原始信号在周跳位置处的差值,插值结果对该

差值并不敏感,因而采用线性插值即可。然后对第二层的高频系数进行同样的处理。从表 3 可以看出,对两层的高频系数进行处理,差值更接近周跳值,当有大的周跳发生时,可以减少迭代次数。笔者曾试图在利用小波方法进行 3 尺度分解后,对第三层的高频系数也进行处理,效果反而变差。因而可以说,因周跳引起的高频能量主要集中在前两层。通过对前两层的高频系数进行处理,可以逐步完成周跳的修复工作。含有 10 周周跳的修复情况见表 3。如果只处理第一层高频系数,需迭代计算 4 次;如果处理两层的高频系数,只需迭代 3 次。当发生多次周跳时,可以同时对高频系数中的多处奇异值进行插值替换,获得修复值后,对多次周跳分别进行修复,完成一次迭代过程。反复迭代,直到所有的周跳修复完成为止。

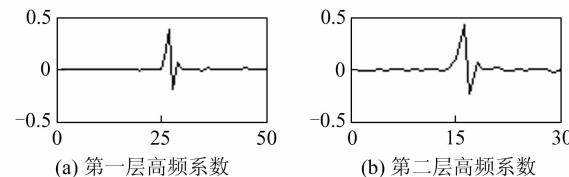


图 4 含 1 周周跳的小波变换高频系数

Fig. 4 High Frequency Coefficient of Wavelet Transform for 1 Cycle Slip

表 2 高频系数插值结果

Tab. 2 Interpolation for High Frequency Coefficients

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	
第一层	高频系数	-0.006 8	0.001 6	0.105 4	0.372 9	-0.181 8	0.053 3	-0.007 2	0.000 6
	插值结果	—	—	-0.000 2	-0.001 9	-0.003 7	-0.005 4	—	—
第二层	高频系数	-0.009 8	0.015 6	0.094 7	0.432 5	-0.223 0	0.070 5	0.009 5	0.006 6
	插值结果	—	—	0.014 4	0.013 2	0.011 9	0.010 7	—	—

表 3 周跳修复情况

Tab. 3 Correction of Cycle Slip

修正高频系数层数	1 周								10 周							
	第一次		第一次		第二次		第三次		第四次		第一次		第二次		第三次	
	差值	修复	差值	修复	差值	修复	差值	修复								
第一层	0.339 3	1	3.338 0	4	2.225 1	3	1.483 3	2	0.988 8	1	—	—	—	—	—	—
第一、二层	0.473 1	1	4.661 2	5	2.491 1	3	1.331 4	2	—	—	—	—	—	—	—	—

## 4 结语

小波变换用于探测周跳是一种很有效的方法,通过一定尺度上的带通滤波器提取出细节信号,并将突变以一定的比例放大,从而发现周跳。与其他方法相比,它具有定位准确、自动化程度高等优点。通过计算中国地壳运动观测网络的部分数据发现,相位与伪距组合观测量能探测到一周,

而双差观测量,即使测站间距很长,仍然能探测到一周的周跳。对于电离层残差观测量,通过原始信号就能容易发现一周的周跳,因而不需要采用其他方法。如果短时间内周跳频繁发生,小波方法探测周跳仍然是可行的。通过对小波变换提取的高频系数进行处理,然后和低频信号一起进行重构,与原始信号比较便可获得周跳修复值,经反复迭代计算,可最终修复周跳。因此,通过小波方法可完全实现周跳的探测和修复。

## 参 考 文 献

- [1] 徐绍铨,张华海,杨志强,等. GPS 测量原理及应用 [M]. 武汉:武汉大学出版社,2003
- [2] Westrop J, Napier M E, Ashkenazi V. Cycle Slips on the Move: Detection and Elimination[C]. The 2nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Colorado, USA, 1989
- [3] Collin F, Warnant R. Application of the Wavelet Transform for GPS Cycle Slip Correction and Comparison with Kalman Filter[J]. Manuscripta Geodaetica, 1995, 20(3):161-172
- [4] 黄丁发,卓健成. GPS 相位观测值周跳检测的小波分析法[J]. 测绘学报,1997,26(4):352-357
- [5] 贾沛璋,吴连大. 单频 GPS 周跳检测与估计算法[J]. 天文学报,2001,42(2):192-197
- [6] 岳建平,席广永. 基于小波变换的 GPS 周跳探测 [J]. 测绘工程,2003,12(4):33-35
- [7] 胡昌华,张军波,夏军,等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001

**第一作者简介:**蔡昌盛,讲师,博士生。现主要从事 GPS 卫星定位技术理论和应用的教学与科研工作。

E-mail: cai\_chang\_sheng@sina.com

## Cycle-slip Detection and Correction of GPS Data by Wavelet Transform

*CAI Changsheng<sup>1,2</sup> GAO Jingxiang<sup>1</sup>*

(1 School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology,

Zhaishan, Quanshan District, Xuzhou 221008, China)

(2 Geomatics and Applications Laboratory, Liaoning Technical University, 47 Zhonghua Road, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** The commonly-used GPS cycle-slip detecting observations are used to detect cycle slips by wavelet method. The minimum cycle slips that can be detected by wavelet transform are obtained, and the wavelet method is compared with high order time differences. Double-difference phase data of cycle slip occurring twice in short time is calculated. Results prove that wavelet method works also well. A method about how to repair cycle slips based on wavelet transform is presented. Then tests are carried out. Results indicate that the method is feasible.

**Key words:** GPS; cycle slips; wavelet transform; high order time differences

**About the first author:** CAI Changsheng, lecturer, Ph. D candidate. He is concentrated on the research and education in the GPS theory and application.

E-mail: cai\_chang\_sheng@sina.com

## 下期主要内容预告

- |                          |       |
|--------------------------|-------|
| ▶ 利用卫星测高资料监测长江中下游湖泊水位变化  | 李建成,等 |
| ▶ 数字式电子水准仪的载码相位法原理       | 叶晓明,等 |
| ▶ 近海Ⅱ类水体的 MODIS 影像大气校正方法 | 刘良明,等 |
| ▶ 基于自组织神经网络的声速剖面分类方法研究   | 赵建虎,等 |
| ▶ 导航电子地图的变比例尺可视化         | 艾廷华,等 |
| ▶ 顾及 $f^3$ 项的电离层延迟模型     | 李征航,等 |