

文章编号:1671-8860(2008)06-0639-05

文献标志码:A

# 基于一类新小波函数基的 GPS 相位观测值周跳探测

郑作亚<sup>1,2</sup> 卢秀山<sup>1</sup> 韩晓冬<sup>1</sup>

(1 山东科技大学测绘科学与工程学院,青岛市前湾港路 579 号,266510)

(2 中国测绘科学研究院,北京市北太平路 16 号,100039)

**摘要:**阐述了可通过 1 个参数因子来调节前后差分点个数的思路,研究了利用小波分析来平滑原始资料和探测 GPS 相位观测值周跳的方法,并通过 CHAMP 卫星实测数据进行分析,得出一些有益的结论。实践表明,该方法提高了周跳探测的有效性。

**关键词:**GPS; 相位观测; 小波分析; 周跳探测

**中图法分类号:**P228.41

对于 GPS 周跳探测与修复,到目前为止已经出现了许多种方法<sup>[1]</sup>,主要有差分法<sup>[2]</sup>、宽带(WL)和伪距组合法<sup>[3]</sup>、电离层组合法<sup>[3]</sup>、动态模型法、多项式拟合法、站间或星间差分法、屏幕扫描法等。这些方法本质上可认为是简单的小波分析法,但有时难以保证可靠性。黄丁发等以 Gauss 函数的一阶、二阶导数为基本小波函数进行不同观测量的周跳探测<sup>[4]</sup>,但是需要取站-星二次差分,对单差及非差不能有效探测周跳,对观测量要求比较高,并且需要双频观测值,不能确定其具体频率上的周跳。另外, Gauss 函数是一个“窗”函数,没有很好的低通滤波效果。贾沛璋利用小波变换对周跳探测的有效性进行了分析<sup>[5]</sup>。

Goad<sup>[6]</sup>等利用一个测站上的双频非差构造电离层残差模型,根据电离层残差变化是否奇异探测周跳。本文利用同一历元内相位和伪距非差宽带组合后的两个频率上模糊度差和定位/定轨后的 O-C(observed minus computed)残差两个观测量分别进行周跳探测分析。

利用宽带组合进行周跳探测,消除了电离层的影响,削弱了对流层、多路径效应等其他误差的影响,而且在不发生周跳的情况下,模糊度差为一常量。但是,由于噪声混叠误差的影响,利用宽带

组合进行周跳探测只能探测出 3 周以上的周跳,难以探测出每个频率上更小的周跳。

在 O-C 残差中,能进一步探测残余的较小周跳,但对于 2 周以内的周跳,由于噪声的掩盖,难以探测,只能在周跳发生位置增设待估参数。因此,该类小波函数对于 2 周以上的周跳探测比较有效。

## 1 一类新的小波函数

Shannon 函数有很好的滤波性能(光滑性),对具有跃阶性的数据很敏感,但其向两端衰减速度很慢,局部性较差;而 Gauss“窗”函数可以通过伸缩因子  $\delta$  很好地控制函数的衰减性,但其低通滤波效果较差。本文取这两个函数的优点,互相补充各自的不足,构造了一类新的小波基函数<sup>[1,7]</sup>进行 GPS 相位观测值周跳探测。

零阶 Z 小波:

$$F(t) = G(t) \cdot S(t) = e^{-\frac{t^2}{2\delta^2}} \cdot \frac{\sin(\pi t)}{\pi t} \quad (1)$$

一阶 Z 小波:

$$Z(t) = e^{-\frac{t^2}{2\delta^2}} \left[ \pi \cdot \frac{\cos(\pi t)}{\pi t} - \left( \frac{t}{\delta^2} + \frac{1}{t} \right) \cdot \frac{\sin(\pi t)}{\pi t} \right] \quad (2)$$

收稿日期:2008-03-25。

项目来源:地理空间信息工程国家测绘局重点实验室资助项目(200710);基础地理信息与数字化技术山东省重点实验室开放研究基金资助项目(SD060804)。

二阶Z小波：

$$M(t) = \tilde{F}(t) = e^{-\frac{t^2}{2\delta^2}} \left[ \frac{tsin(\pi t)}{\pi\delta^4} + \frac{\frac{\sin(\pi t)}{\pi t} - 2\cos(\pi t)}{\delta^2} + \frac{\frac{2\sin(\pi t)}{\pi t} - \pi t\sin(\pi t) - 2\cos(\pi t)}{t^2} \right] \quad (3)$$

关于所构造的新的小波函数的完备性、正交性和紧支集性等性质见文献[1]。

## 2 GPS资料的小波分析

为了分析该类小波函数在GPS数据处理中的应用,本文以2001年7月16日CHAMP卫星的部分GPS观测资料为例,利用这类小波对GPS资料 $b_\delta = b_1 - b_2$ 、O-C残差等观测量进行小波分析(取 $\delta=7$ ,具有较好的衰减性、平滑性和较小的端点效应<sup>[8]</sup>),观测资料采样间隔为10 s。

### 2.1 同历元模糊度差 $b_\delta = b_1 - b_2$ 的小波分析

#### 1) 一阶、二阶Z小波变换

从图1~图3中可以看出,由于 $\delta$ 因子的大小带来不同程度的边缘效应,因此,利用该小波分析GPS资料要考虑边缘效应问题。同时,从图1中可以看到,对于一些明显周跳,该类小波可以完全探测出来;从图2中可以看出,对于没有周跳的资料序列,小波变换后表现为平稳的信号;图3中人为增加了1个周跳,从一阶Z小波变换图中可

以看出,在周跳发生位置有明显的突变信息。

2) 平滑和压缩效应由Shannon函数和Gauss“窗”函数构造而成的零阶Z小波 $F(t)$ 有很好的平滑和压缩效应,其平滑和压缩程度可由伸缩因子 $\delta$ 来控制。从图4中可以看出,平滑后资料能很好地反映原信号的本征特征,说明零阶Z小波 $F(t)$ 对资料有很好的平滑和压缩效应。

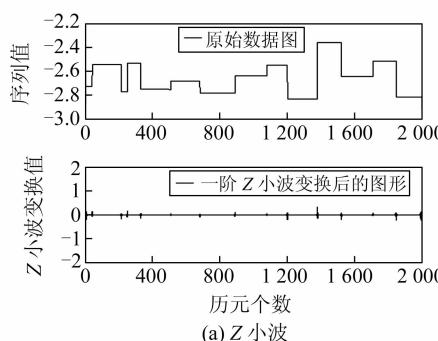
#### 3) 其他小波变换

从图5可以看出,利用Daubechies小波和Haar小波对GPS观测资料进行小波分析,只能按照某确定频率分层探测,而不能在一个变换中得到不同程度的奇异点。因此,这两类小波不能同时兼顾很好的光滑性和局部性。

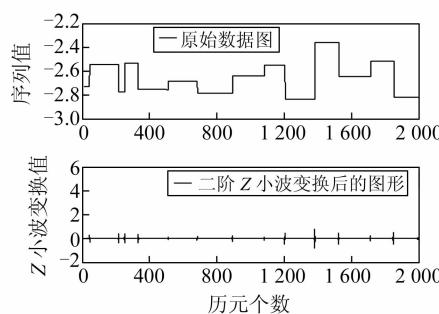
### 2.2 O-C残差小波分析

#### 1) 无周跳序列

从图6可以看出,在没有周跳的情况下,一阶、二阶小波变换后没有奇异点;另外,根据伸缩因子 $\delta$ 和紧支集长度不同,会带来不同程度的边缘效应。因此,在控制 $\delta$ 的同时,也要考虑步长 $h$ 的取值。



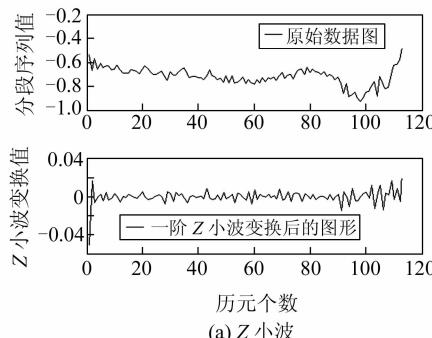
(a) Z小波



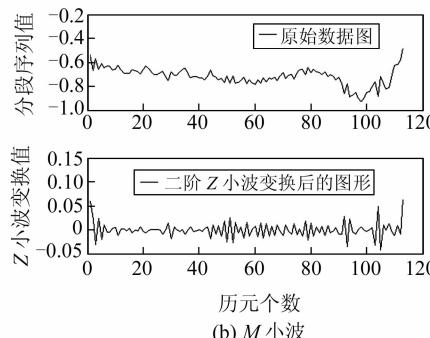
(b) M小波

图1 PRN30卫星1 d资料的Z小波和M小波分析

Fig. 1 Analyzing Data Received from PRN30 Satellite with Z and M Wavelet



(a) Z小波



(b) M小波

图2 PRN30资料中一段“干净”资料的Z小波和M小波分析

Fig. 2 Analyzing Data No Cycle-Slip with Z and M Wavelet

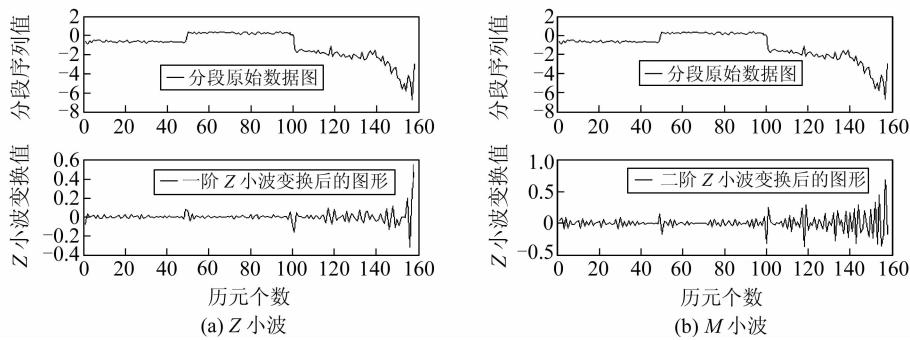


图 3 人为加 1 个周跳的 Z 小波和 M 小波分析

Fig. 3 Analyzing Data After Adding One Cycle-Slip with Z and M Wavelet

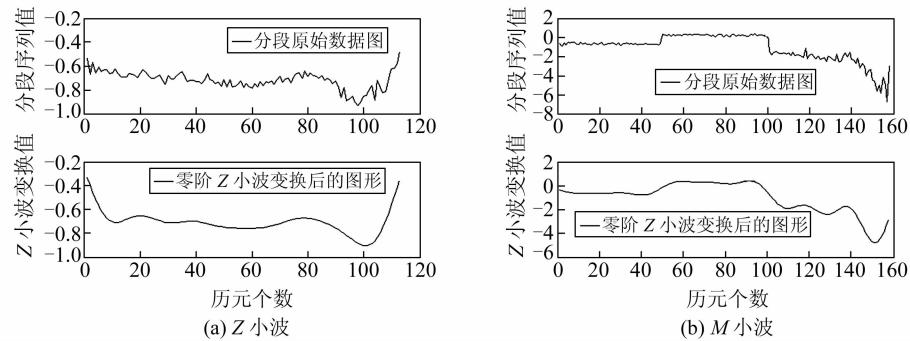
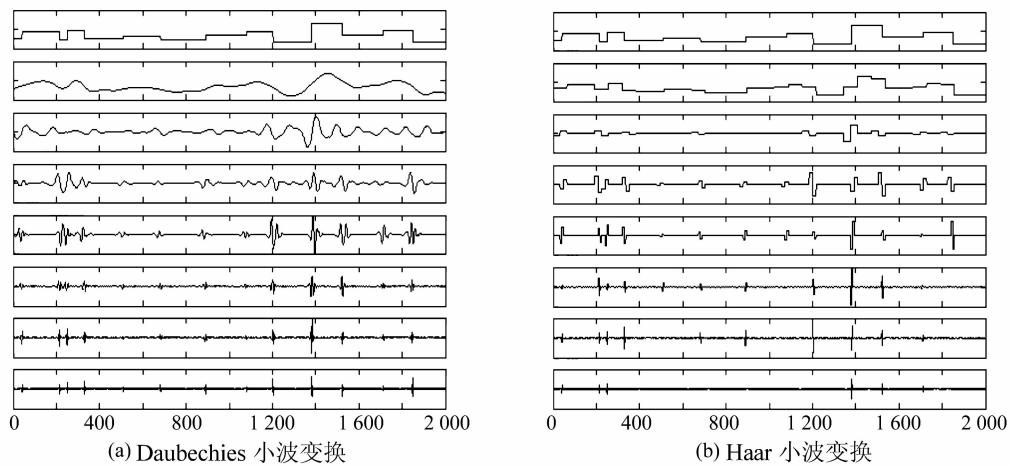
图 4 零阶 Z 小波  $F(t)$  的资料平滑和压缩效应Fig. 4 Data Smoothing and Compress with Father Wavelet  $F(t)$ 

图 5 利用 Daubechies 小波函数和 Haar 小波函数的小波变换

Fig. 5 Data Wavelet Transformation with Daubechies and Haar Wavelet

## 2) 有周跳序列

从图 7 可以看出, O-C 残差平滑后, 利用零阶 Z 小波对观测值有较好的平滑和压缩效应, 一阶 Z 小波  $Z(t)$  和二阶 Z 小波  $M(t)$  可以较好地探测一些残余小周跳。

## 3 结 语

目前, 常用的 GPS 相位观测值周跳探测方法

本质上属于简单的小波分析。本文提出了前后差分点个数由 1 个参数因子来调节的思路。根据 Shannon 函数和 Gauss 函数的各自优点构造了一类新的小波函数, 并将其应用于 CHAMP 卫星的 GPS 相位观测值的周跳探测中。实例分析表明, 零阶 Z 小波对观测资料有很好的平滑和压缩效果, 一阶、二阶 Z 小波对周跳有较好的探测效果, 但不同的参数因子和紧支集长度会带来不同的端点效应, 与 Daubechies 和 Haar 等小波函数相比,

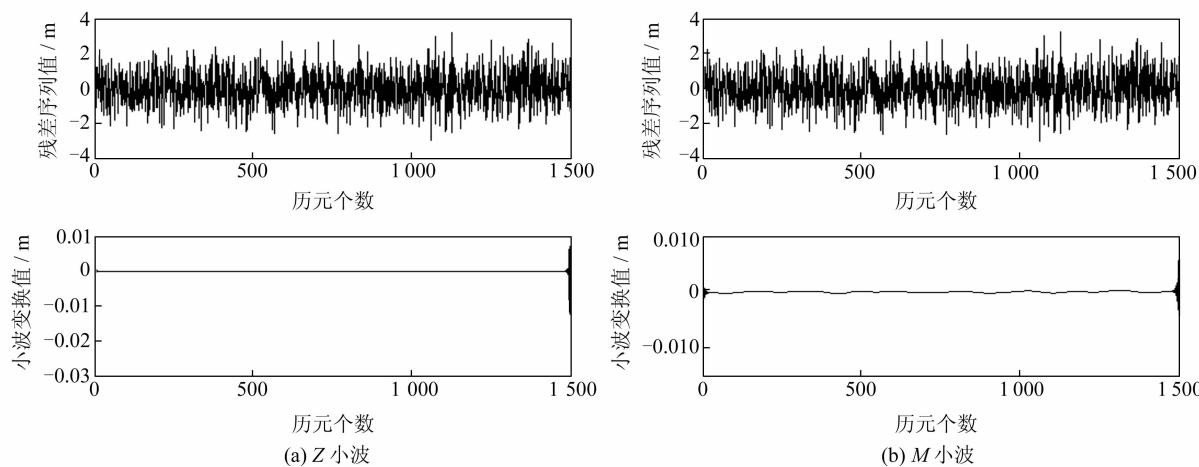
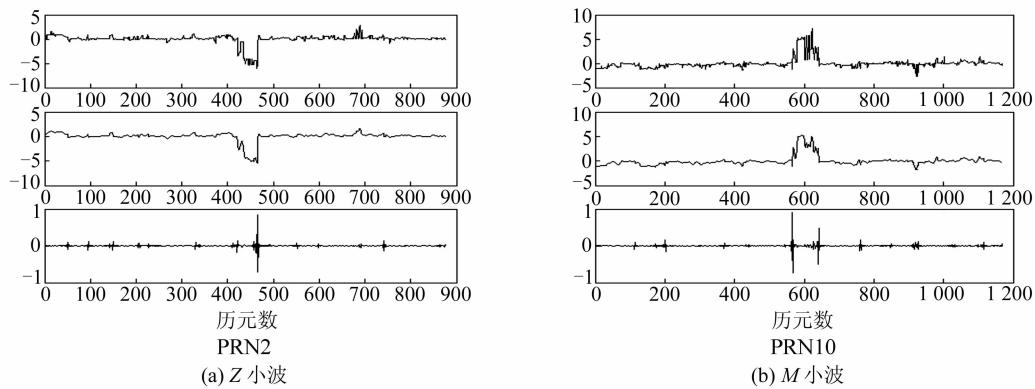
图 6 无周跳序列的小波分析( $h=1$ )Fig. 6 Analyzing No-cycle-slip Data with  $Z$  and  $M$  Wavelet

图 7 O-C 残差小波分析

Fig. 7 Analyzing O-C Residual with Wavelet

能同时兼顾函数的滤波性和局部性。基于该小波函数的 GPS 相位观测值周跳探测,提高了周跳探测的有效性和可靠性,有助于 GPS 数据预处理和定位精度提高。

## 参 考 文 献

- [1] 郑作亚. GPS 数据预处理和星载 GPS 运动学定轨研究及其软件实现[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2005
- [2] Remondi B W. Performing Centimeters Relative Surveying in Seconds Using GPS Carrier Phase: Initial Results[J]. Navigation, 1985, 32(4): 386-400
- [3] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3): 199-202
- [4] 黄丁发, 卓健成. GPS 相位观测值周跳探测的小波分析[J]. 测绘学报, 1997, 26(4): 352-357
- [5] 贾沛璋, 吴连大. GPS 周跳检测与估计算法[J]. 天文学报, 2001, 42(2): 192-197
- [6] Goad C C. Precise Positioning with the GPS[C]. CERN Applied Geodesy for Particle Accelerators, Geneva, 1986
- [7] Zheng Zuoya. Constructing a Type of New Wavelet Function and Its Application in GPS Data Pre-processing [J]. AVN, 2005; 11-12
- [8] 郑作亚, 卢秀山, 李克行. 一类小波基函数的构造及其在测量数据处理中的应用探讨[J]. 测绘科学, 2007, 32(3): 9-11

第一作者简介: 郑作亚, 博士, 副教授。主要从事 GNSS 定位、定轨与导航及其应用, 空间大地测量和地球动力学方面的研究。

E-mail: caszzy@gmail.com

## GPS Phase Measurement Cycle-Slip Detection Based on a New Wavelet Function

ZHENG Zuoya<sup>1</sup> LU Xiushan<sup>1</sup> HAN Xiaodong<sup>1</sup>

(1) Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, 579 Qianwangang Road, Qingdao 266510, China)

(2) Chinese Academy of Surveying and Mapping, 16 Beitaiping Road, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A new idea is put forward that the number of difference point can adjust by a parameter factor. The authors study this method to smooth raw data and detect cycle-slip with wavelet analysis. Taking CHAMP satellite data for example, the authors get some significant conclusions. It is showed that it is valid to detect cycle-slip in GPS phase measurement based on this wavelet function; and it is helpful to improve the precision of GPS data pre-processing and positioning.

**Key words:** GPS; phase measurement; wavelet analysis; cycle-slip detection

---

**About the first author:** ZHENG Zuoya, associate professor, Ph. D, research on GNSS, spatial-geodesy and geodynamics.

E-mail: caszzy@gmail.com

---

(上接第 618 页)

## Geoid Deformation and Elevation Affection Caused by Building Loading

WANG Jiexian<sup>1,2</sup> JI Shanbiao<sup>3</sup> CAO Yueling<sup>1</sup> YU Meiyi<sup>3</sup>

(1) Department of Surveying, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

(2) Key Laboratory of Advanced Engineering Survey of SBSM, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

(3) Shanghai Surveying and Mapping Institute, 419 Wuning Road, Shanghai 200063, China)

**Abstract:** Based on the loading tide theory, the ground vertical deformation and the geoid undulation caused by loading of neighboring buildings are studied. Further more, the influence on elevation is also considered. The result shows that the ground vertical deformation and the geoid undulation have both reached millimeter magnitude. So it is obvious that the building loading has affected the precise engineering surveying a lot; and it must be seriously considered during the future applying.

**Key words:** loading tides; building loading; ground deformation; geoid undulation

---

**About the first author:** WANG Jiexian, professor, Ph. D supervisor, his main research focuses on the GPS theory and the satellite orbit determination and positioning.

E-mail: wangjiexian@mail.tongji.edu.cn