

# 基于 GPS 相位观测值差分的小波变换 在周跳探测中的应用

王 波<sup>1,2</sup>, 张书毕<sup>1</sup>, 李益斌<sup>1,2</sup>, 卞和方<sup>1,2</sup>

(1 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221008)

2 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 针对 GPS 载波相位观测值中出现的周跳, 首先分别对 GPS 相位观测值做单差和双差处理, 再根据小波变换检测信号的奇异性原理, 将 GPS 相位观测值发生周跳处视为信号的奇异点, 通过 MATLAB 编程, 分别对相位单差和双差观测值进行小波变换来探测周跳。实验证明, 基于差分法的小波变换周跳探测效率比较高, 周跳位置探测比较准, 而且双差观测值的周跳探测比单差观测值效果好。

**关键词:** GPS 相位观测值; 周跳探测; 小波变换; 差分

中图分类号: P228 4 文献标识码: B 文章编号: 1672- 5867(2008)06- 0114- 03

## Application of Cycle-slip Detection of GPS Phase Observation Based on Wavelet Transformation by Difference

WANG Bo<sup>1,2</sup>, ZHANG Shu-bi<sup>1</sup>, LI Yi-bin<sup>1,2</sup>, BIAN He-fang<sup>1,2</sup>

(1 School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

2 Jiangsu Key Laboratory of Resource and Environmental Information Engineering Xuzhou 221008, China)

**Abstract** According to the cycle-slip of GPS carrier phase observation, in the paper the author firstly makes a single-difference and a double-difference respectively to GPS carrier phase observable and the location of the cycle-slip is regarded as the bizarre point of the signal according to the principle of signal oddity detection and secondly the wavelet transformation is used to detect the cycle-slip of the GPS carrier phase measurements to the single-difference and double-difference phases individually by programming with MATLAB. The experiments have indicated that the efficiency to detect the cycle-slip of GPS phase observation is higher based on wavelet transformation by difference, and the place of the cycle-slip is detected to be exact and moreover that effect of the detection of the double-difference is better than that of the single-difference phase observable.

**Key words** GPS phase observable; cycle-slip detection; wavelet transformation; difference

### 0 引言

高精度 GPS 定位普遍采用载波相位测量, 然而载波信号受多种因素影响, 如对流层、电离层折射、卫星与接收机钟差、多路径效应等影响。这些因素的存在使 GPS 观测值中含有不同类型的误差: 系统误差、偶然误差、粗差。对于粗差主要是周跳的处理, 周跳的处理是令人感到最头痛的问题之一。周跳是由于被障碍物遮挡或无线电干扰等原因引起载波信号暂时中断, 使得计数器无法连续计数, 从而使得相位观测值整周数产生跳变。周跳产生的原因很多, 主要有以下 4 个方面: (1) 卫星信号的暂时中断。这主要是由于树木、建筑物、桥梁、山峰等障碍

物阻挡而引起的, 这个是周跳最为常见的来源。(2) 卫星信号的信噪比过低。这主要是由于电离层条件差、多路径效应、接收机的强振荡或卫星高度过低而引起的。(3) 接收机发生故障, 从而导致错误的信号处理, 使基准信号无法和卫星信号混频以产生差额信号, 或虽产生了差额信号但无法正确计数。(4) 由于外界干扰或接收机所处的动态条件恶劣(动态观测), 使得载波跟踪环路无法锁定信号而引起信号的暂时失锁。

一直以来周跳的探测与修复是 GPS 数据处理中研究热点之一, 也是 GPS 数据处理中不可或缺的一部分。除了高次差、多项式拟合法、电离层残差法<sup>[1-3]</sup> 等外, 也有学者研究了利用小波探测周跳的方法<sup>[4-6]</sup>。基于此, 本文主

收稿日期: 2008- 05- 16

作者简介: 王 波 (1981- ), 男, 湖北荆门人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 GPS 应用与测量数据处理。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

要研究了针对 GPS 载波相位观测值差分法的小波变换在周跳探测中的应用, 得出了一些有益结论。

### 1 基本原理

#### 1.1 小波变换原理

小波变换是现代分析中一种强有力的工具, 由于其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, 因此素有数学显微镜之称<sup>[7-8]</sup>。它具有多分辨率分析 (Multi-resolution Analysis) 的特点, 而且在时频两域都具有表征信号局部特征能力, 是一种窗口大小不变而形状可以改变的时频分析方法。

对于连续小波变换而言, 小波变换是一个平方可积函数  $f(t)$  与一个在时频上均具有良好局部性质的小波函数  $\phi(t)$  的内积:

$$W_f(a, b) = \langle f, \phi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

式中,  $\langle *, * \rangle$  表示内积,  $a > 0$  为尺度因子,  $b$  为位移因子,  $*$  表示复数共轭,  $\phi_{a,b}(t)$  称为小波

$$\phi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi \left( \frac{t-b}{a} \right) \quad (2)$$

改变  $a$  值, 对函数  $\phi_{a,b}(t)$  具有伸展 ( $a > 1$ ) 或收缩 ( $a < 1$ ) 的作用; 改变  $b$ , 则会影响函数  $f(t)$  围绕  $b$  点的分析结果。

$\phi(t)$  称为母小波,  $\phi(t)$  必须满足容许性条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(t) dt = 0 \text{ 或 } \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Phi(\omega)|^2}{\omega} d\omega = C_\phi < \infty \quad (3)$$

其中,  $\phi(t)$  是  $\Phi(\omega)$  的傅立叶变换。

对于离散小波, 函数表示为:

$$\phi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \phi \left( \frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \phi(a_0^{-m} t - nb_0) \quad (4)$$

离散小波变换有

$$W_f(m, n) = \langle f, \phi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi_{m,n}^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (5)$$

式中,  $m, n$  为整数; 当  $a_0 = 2, b_0 = 1$  为常用的二进制离散小波变换。

小波重构表示为:

$$f(t) = \frac{1}{C} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2a^2} \omega_f(a, b) \phi \left( \frac{t-b}{a} \right) da db \quad (6)$$

#### 1.2 信号奇异性检测原理

信号中的奇异点及不规则的部分经常带有比较重要的信息, 这是信号的重要特征, 而且小波变换的一个重要性质是它在时频两域都具有突出信号局部特征的能力, 我们对信号进行分析总是根据提取信号的某些共同特征 (如信号的极值点、过零点和过零间隔点以及信号的急剧变化之处等) 来进行解释和说明, 因此, 可以利用小波变换来分析信号的奇异性、奇异性位置以及奇异度的大小。信号的奇异性可用李普西兹 (Lipschitz) 指数来刻画, 对于

平滑了的函数  $f(x)$ , 若  $x_0$  为它的奇异点, 则可用极小化函数:

$$E(a, K, \sigma) = \sum_{j \in J} [a_j - K \cdot 2^j (\sqrt{2^{2j} + \sigma^2})^{a-1}]^2 \quad (7)$$

来测定  $f(x)$  在  $x_0$  的李普西兹指数  $a_0$ , 平滑化参数  $\sigma$  以及系数  $K_0$  的值。在具体测定信号奇异位置及奇异度时, 通常先对小波变换实行二进离散化, 即在数值计算中, 总是对一个有限指标集  $J$  做二进小波变换, 实际求得的值为:

$$\{w_{2^j} f(x_0)\}_{j \in J}, J \text{ 为有限整数集}$$

令  $a_j = |w_{2^j} f(x_0)|, j \in J$ , 并假定  $2^j$  充分小, 则有  $|w_{2^j} f(x_0)| = K_0 2^{ja_0}$  (具体推导参见文献 [7])。  $a_0, K_0$  为常数, 则

$$E(a, K) = \sum_{j \in J} (a_j - K \cdot 2^j)^2 \quad (8)$$

应在  $(a_0, K_0)$  处取得最小值, 从而可确定  $x_0$ , 也就确定了信号的突变点。

### 2 小波变换检测 GPS 相位观测值中的周跳

GPS 接收机接收的信号是一个随时间变化的量, 载波相位观测值作为时间函数的量之一, 其随时间变化为一条连续光滑的曲线, 当有周跳时, 曲线的光滑性被破坏。从发生周跳的历元起, 以后的所有载波观测值都含有相同的周跳, 而且自该历元开始后继相位观测值序列均会发生等量阶跃<sup>[9]</sup>, 即周跳具有继承性, 如图 1 所示。

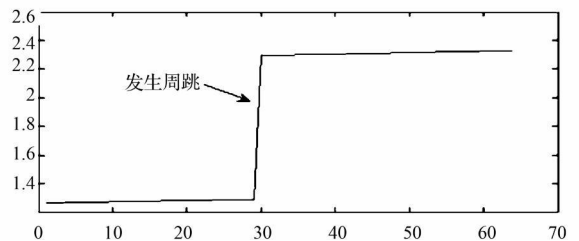


图 1 载波相位发生周跳

Fig 1 Cycle-slip occurrence in the carrier phase observation

周跳可以看做是 GPS 载波观测值的异常值, 采用小波变换对观测序列进行分解, 通过不同尺度来观测信号, 就可以找到突变点的位置。由于对流层、电离层折射、卫星与接收机钟差、多路径效应等因素影响, 经差分处理可以大大削弱这些相关系统误差的影响。因此选择差分观测值作为小波变换的观测序列效果较原始观测值好。为了说明这一点, 本文采用 EUREF 欧洲永久站网 (EPN) 的 FEM J 和 ZM J 两个测站上 2003 年 5 月 18 号的观测资料, 两个测站都使用 JPSLEGACY 型接收机, 采样率为 30 s, 观测长度为 34 min 同步观测 PRN 7 和 PRN 30 两颗卫星。为了分析 GPS 载波在非差、单差和双差 3 种不同模型下小波探测周跳的效果, 笔者在 ZM J 测站上观测到的卫星 PRN 7 的  $L_1$  载波第 30 个历元上人为加入 0.5 周跳、1 周跳、5 周跳, 分析不同周跳在不同模型下的小波分析效果 (如图 2 图 3 图 4 图 5 所示)。基于 MATLAB 7.0 软件

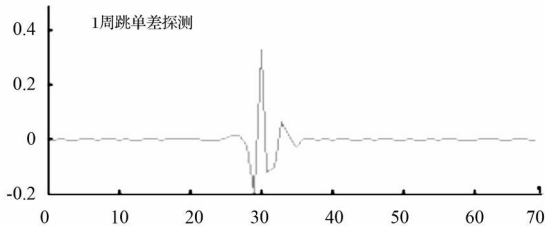


图 2 非差相位

Fig 2 Zero- difference carrier phase

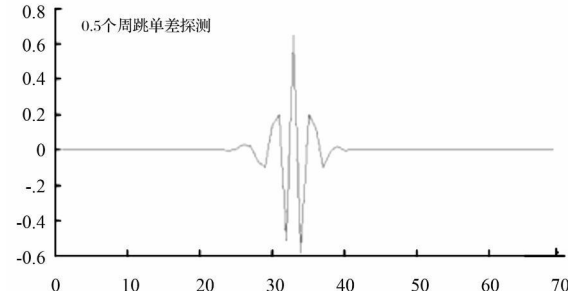


图 3(a) 单差相位

Fig 3(a) Single- difference carrier phase

平台, 经过多次试验, 笔者采用 Daubechies 小波系数中 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, 利用重构信号直接来探测周跳。

由于重构信号高频部分没有出现“毛刺”现象, 说明这两个测站的观测条件相对较好, GPS 相位观测值受各种噪声影响不大。从图 3- 2 看出含 1 周跳的非差信号探测效果不是很好, 但是从图 3- 3(b)、图 3- 4(b)、图 3- 5 (b) 不难看出, 当 GPS 观测值中分别含有 0 5 个、1 个、5 个周跳时, 采用小波变换探测周跳, 双差模型较单差效果好, 并且探测 5 个周跳的效果最佳。

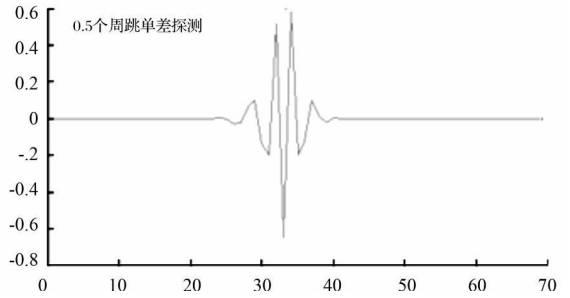


图 3(b) 双差相位

Fig 3(b) Double- difference carrier phase

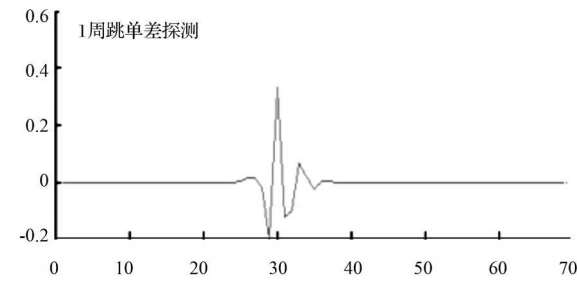


图 4(a) 单差相位

Fig 4(a) Single- difference carrier phase

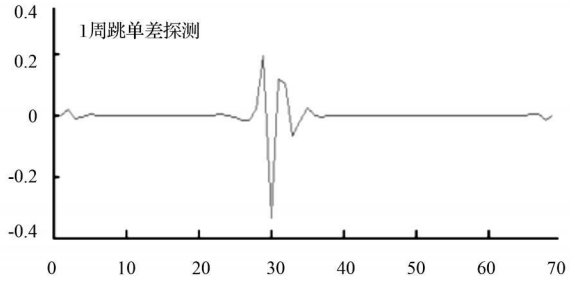


图 4(b) 双差相位

Fig 4(b) Double- difference carrier phase

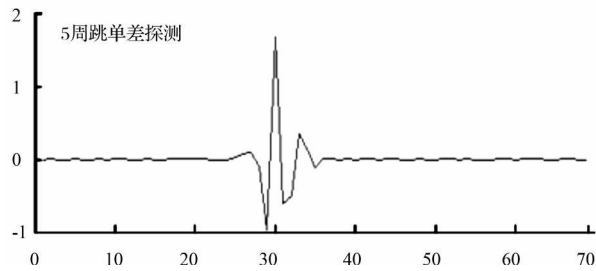


图 5(a) 单差相位

Fig 5(a) Single- difference carrier phase

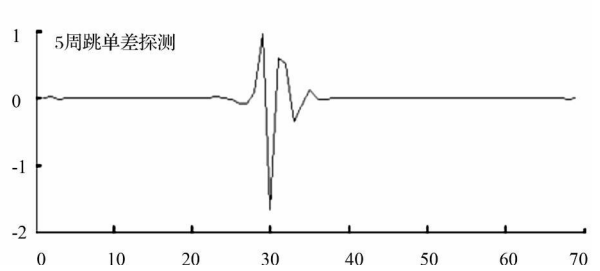


图 5(b) 双差相位

Fig 5(b) Double- difference carrier phase

### 3 结束语

实验证明, 小波变换具有空间局部化性质, 用于探测周跳是一种很有效的方法。它具有自动化程度高、定位

准确的优点, 特别在双差模型中探测周跳时, 效果较非差、单差观测值好, 而且周跳越大, 效果越明显。基于 GPS 相位观测值差分的小波变换来探测周跳具有很好的参考价值 and 实用价值。  
(下转第 119 页)

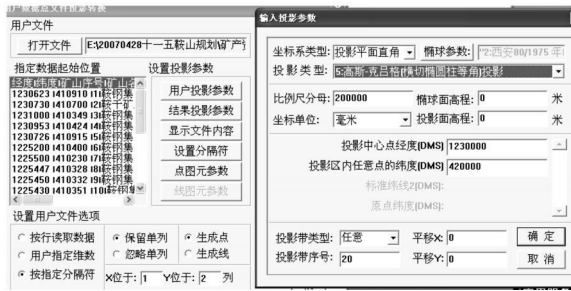


图 2 用户数据点文件投影变换

Fig 2 The projection transformation of points file of user data

利用投影变换生成 1:200 000 标准图框, 将转换的矿产地统一在投影直角坐标中。结果如图 3 所示。



图 3 矿产资源分布图

Fig 3 The mineral resources distribution map

### 1.4 规划分区结果及评述

规划图中包括地理要素: 主要山脉、河流、县级以上行政区域界线, 县级以上城市(县城)、部分中心镇名称、主要铁路、公路等基础设施; 地质要素: 以 1:200 000 数字地质图为辅助底图。标明主要的地层界线、岩体、断裂控

矿构造等。根据矿产资源分布特征和开发状况, 构建与全市产业布局相协调的新格局, 作出以下规划:

#### 1) 矿产资源调查评价与勘查规划

包括什司县钼、钴、铁、镍成矿远景区等 18 个鼓励勘查区; 西鞍山 - 大孤山 - 眼前山铁矿带等 5 个限制勘查区; 千山国家风景名胜等 10 个禁止勘查区。

#### 2) 矿产资源开发利用与保护规划

包括鞍山城区周边铁矿矿业经济区等 4 大矿业经济区; 齐大山 - 胡家庙子铁矿等 16 个矿产开发加工基地; 岫岩三家子 - 石庙子锌、铜、金等 7 个鼓励开采区; 牧牛钨、钼等 7 个限制开采区; 千山国家风景名胜等 10 个禁止开采区。

#### 3) 矿山生态环境保护与恢复治理规划

包括生态环境问题严重区、中等区和轻微区, 对问题严重区进行植被恢复治理, 对市、县以上的风景名胜区、自然保护区和森林公园共 8 个生态功能区进行保护。

## 2 结束语

本文通过 MAPGIS 的投影变换功能, 大量原始数据文件快速、准确地转换成动态的矿产资源分布特征图件, 全面地对矿产资源调查评价与勘查区、矿产资源开发与保护区、矿山生态环境保护与恢复治理区进行了规划, 为决策者在本地区矿产资源规划中提供了数据支持。

## 参考文献:

[1] 吴信才. MAPGIS 地理信息系统 [M]. 北京: 电子出版社, 2004.

[2] 鞍山市国土资源局. 鞍山市矿产资源总体规划 (2006-2020) [G]. 2007.

[3] 中国地质大学 (武汉) 工程学院. MAPGIS 地理信息系统用户教程 [M]. 武汉: 武汉地质大学出版社, 1998.

[责任编辑: 姚艳霞]

(上接第 116 页)

## 参考文献:

[1] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[2] 刘基余, 李征航, 王跃虎, 等. 全球定位系统原理及应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 1993.

[3] 李学逊. GPS 相位观测值中周跳的探测与修复 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1994 (3): 57-61.

[4] 郑作亚, 黄斌, 卢秀山. 小波分析理论在 GPS 技术中的应用 [J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2003 (24): 48-55.

[5] 黄丁发, 卓建成. 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.

[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] 程正兴, 杨守志, 冯晓霞. 小波分析的理论、算法、进展和应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

[8] 张善文, 雷英杰, 冯有前. MATLAB 在时间序列分析中的应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.

[9] 岳东杰. 水利水电工程变形监测中 GPS 技术与数据处理研究 [D]. 南京: 河海大学博士论文, 2006.

[10] Collin F W, amant R. Application of the Wavelet Transform for GPS Cycle Slip Correction and Comparison with Kalman Filter [J]. Manuscripta Geodetica, 1995, 20 (3): 161-172.

[责任编辑: 姚艳霞]