

# 基于小波变换的 GPS 精密单点定位中的周跳探测

黄兵杰<sup>1,2,3</sup> 柳林涛<sup>1</sup> 高光星<sup>3</sup> 周 剑<sup>3</sup>

(1 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学开放实验室, 武汉市徐东大街 340 号, 430077)  
(2 中国科学院研究生院, 北京市石景山区玉泉路甲 19 号, 100039)  
(3 武汉市勘测设计研究院, 武汉市万松园路 209 号, 430022)

**摘 要:** 基于双频观测值的 Melbourne-Wübbena 组合和 Geometry free 组合, 提出了利用连续小波变换方法来探测 GPS 相位观测值中的周跳, 论述了 GPS 精密单点定位中的周跳探测和连续小波变换方法探测周跳的算法, 说明利用高斯函数的一阶求导小波变换对周跳的多尺度分解的敏感性, 能够提高组合观测信号的信噪比, 准确定出 1 周左右的周跳发生位置, 从而可以提高利用非差观测值解算周跳和模糊度的效率, 并给出具体算例验证了本方法的可行性和有效性。  
**关键词:** 精密单点定位; 连续小波变换; 周跳  
**中图法分类号:** P228.41

在 GPS 数据观测过程中, 周跳现象不仅可能频繁发生, 而且可能出现上万周的周跳。大于 10 周的周跳, 在数据处理中较容易发现, 但小于 10 周的周跳, 特别是 1~5 周的小周跳或半周跳, 在数据处理中很难发现, 如果发生 1 周的周跳, 在较差的卫星几何图形下可能对测点坐标产生几 cm 的误差<sup>[1]</sup>。因此, 对于高精度的 GPS 数据处理, 周跳的探测是 GPS 载波相位数据处理中不可缺少的重要组成部分, 只有消除了周跳的相位数据, 才能用于精密定位。所以, 研究周跳的检测和修复对于 GPS 精密定位具有重要意义<sup>[2-4]</sup>。

GPS 精密单点定位 PPP (precise point positioning) 是利用高精度的卫星星历和钟差以及双频载波相位观测值, 采用非差模型进行单点定位的方法<sup>[5]</sup>。与双差的方法相比较, 非差观测值的数据处理更困难。非差相位观测值周跳探测研究的方法很多, 如利用多项式拟合法或高次差法来探测和修复比较大的周跳; 利用卫星间求差来探测和修复与卫星有关的周跳, 用双频 P 码或根据电离层的延迟变化也可探测大的周跳; 对动态定位中周跳的探测, 则常用卡尔曼滤波方法。本文用高斯函数的一阶求导小波对 GPS 的非差观测值进行处理, 可以准确地探测到 1 周左右周跳发

生的位置。

## 1 Gipsy 软件检查周跳的算法

美国 JPL 研制的 Gipsy 软件也加进了 PPP 的算法, 它采用两种  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  的线性组合, 来消除电离层、对流层、钟差和计算的几何观测值等因素的影响, 而且具有较长的波长 (约为 86 cm)、较小的量测噪声等特点, 因此, 适合用于非差周跳的探测和修复。其步骤为: 利用 Melbourne-Wübbena 组合进行野值点的剔除、周跳的探测和修复及估计宽巷整周模糊度初值; 利用 Ionosphere-free 组合进行野值点剔除; 利用 Geometry-free 组合进行周跳探测修复; 估计 Geometry 组合的整周模糊度<sup>[6,7]</sup>。

## 2 基于连续小波变换的周跳探测法

小波变换是一种时频域的分析方法, 它将时域的一维信号变换为时间-尺度的二维空间。原时间域上的信号在小波的变换域上得到一个表示, 一些在原时间域上因混叠而不易观察的信号特征能在变换域的某个尺度上得到显著体现, 从

而能在变换域上达到最有效的信号处理目的。

对于任意的函数  $f(t) \in L^2(R)$ , 若选用的小波基函数为  $\Psi(t)$ , 则信号的卷积型连续小波变换为:

$$W_f(t) = f(t) * \Psi_a(t) dt = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau \tag{1}$$

式中,  $a$  为尺度因子, 一般取尺度  $a = 2^j, j \in Z$ 。对变换进行二进制离散, 而  $t$  取连续变化的值  $\Psi_a(t) = 1/a * \Psi(t/a)$ ,  $\Psi(t)$  称为基本小波函数,  $\Psi(t)$  一般取为某低通平滑函数  $\theta(t)$  的  $n$  阶导数, 该平滑函数满足容许条件:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \theta(t) dt = 1 \text{ 和 } \lim_{t \rightarrow \infty} \theta(t) = 0 \tag{2}$$

由高斯函数可以构造一个小波系列, 许多文献提到的墨西哥帽小波就是高斯函数的二阶导数。事实上, 可以证明高斯函数的各阶导数均满足小波函数的容许条件<sup>[8]</sup>。

小波函数  $\Psi^j(t)$  是高斯平滑函数  $\theta(t)$  的一阶导数, 用  $\Psi^j(t)$  对  $f(t)$  作小波变换, 此时小波变换的零点正是  $df/dt = 0$  之点, 即  $f(t)$  的模的极大值点。GPS 周跳信号的突变表现为阶跃信号, 所以这次实验的小波函数取具有反对称的高斯函数的一阶导数。

由小波变换的原理可知, 在给定小波  $\Psi_{ab}(t)$  后, 变换要求不断减小其中的尺度参数  $a$ , 以便聚焦到信号的细节处, 同时, 增加频率的分辨率对该细节处进行变换以寻求  $W_f(a, b)$ 。如此不断变化平移参数  $b$  以便搜索整个信号, 根据所求得的最大变换  $W_f(a, b)$  的模, 就可得出急剧变化的时间结果  $b$ , 它对应着信号的时间点, 即为周跳发生的历元。

### 3 算例分析

本文应用 2003-03-10 武汉九峰台站 1 h 的数据进行了实验。该站采用 JPS LEGACY 型 GPS 接收机进行观测, 采样间隔为 30 s, 观测时段长度为 80 min。取其中 PRN04 卫星, 组成观测量组合, 在卫星 PRN04 的  $L_1$  载波相位的第 100 历元人为地加上 5 周、1 周周跳, 分析不同周跳在不同模型下的小波分析效果。对所测数据进行分析, 结果如图 1、图 2 所示, 图中, 左边图形为 Melbourne-Wübbena 组合信号图及连续小波变换的尺度-位置-模的极大值分布图; 右边图形为 Geometry-free 组合信号图及连续小波变换的尺度-位置-模的极大值分布图。图 1 为加入 5 周周跳

情况下 PRN04 卫星组合观测量的信号和连续小波变换图。

从连续小波变换尺度-位置-模值图中可以看出, 当信号的突变信息与小波相似时, 小波系数的模就会使信号的特征信息在尺度-时间相平面上集结为高幅值的能量块; 而与基小波不相似的部分, 小波系数则较小, 能量被小波变换所吸收, 从而实现特征信息的检测。可以很明显地从图 1、图 2 找到, 在第 100 历元, 有明显的能量集中区域, 因此, 周跳必定发生在此。

从理论上讲, 尺度越小, 平滑区域就越小, 小波系数模极大值点与突变点位置的对应就越准确。但是, 小尺度下小波系数受噪声影响非常大, 产生许多伪极值点, 往往只凭一个尺度不能定位突变点的位置。实验证明, 选择尺度为  $j = 5, a = 2^5$  的效果比较好。

从图 1、图 2 的多尺度分解的图来看, 原始信号在  $j = 1, 2, 3, 4, 5$  尺度的小波变换下, 随着小波尺度的增加, 原始信号小波变换模的极大值数量有了明显的减少, 突变信号奇异点模的极大值随尺度的增大而增大, 具有正的 Lipchitz 指数, 而噪声模的极大值随尺度的增大而减小, 具有负的 Lipchitz 指数, 随着尺度增大, 直至衰减为零。从图中看出, 其模的极大值在小波变换下具有不同的变化趋势, 从而也在另一方面验证了将连续小波变换运用于抑制白噪声的可行性。

从图 2 可知, 当周跳在 1.5 周范围内时, Melbourne-Wübbena 线性组合能从连续小波变换看到能量集中的区域, 在多尺度下能定出在 100 历元下发生周跳的位置。对于 Geometry-free 线性组合, 在尺度 1 能明显看出在 100 历元处的突变, 但是由于信噪比较小, 不能明显地分辨出能量的集中中心。

从上述各图的变化还可知, 当周跳越大, 突变信号的模的极大值越大, 定位越准确, 检测信号的效果越明显, 且 Melbourne-Wübbena 线性组合观测量比 Geometry-free 线性组合观测量效果好, 可以准确地对 1 周左右的周跳定位。

### 4 结 语

高斯函数的一阶求导小波变换能够任意选取变换的尺度参数, 而且变换后的数据点和原信号一一对应, 即具有尺度连续性和时频不变性的特点, 有利于准确提取奇异点的位置。利用连续小

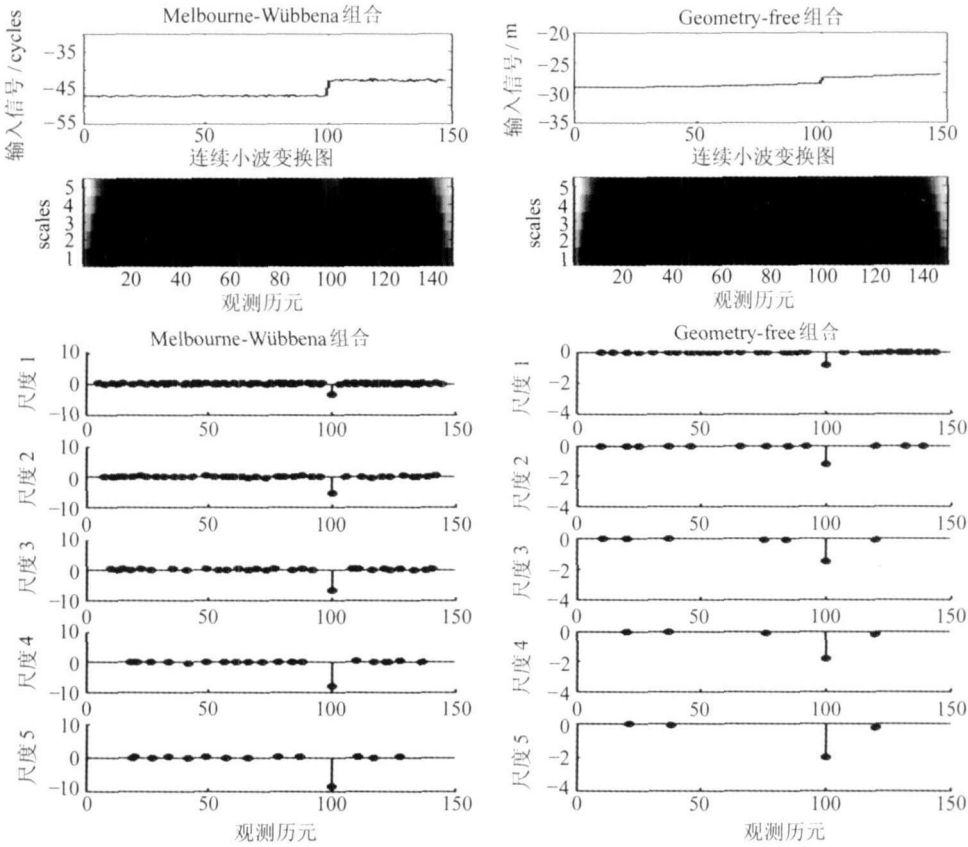


图 1 含 5 周周跳时组合观测值信号图及其小波变换图

Fig. 1 Signal and Wavelet T Transform Graph with 5 Cycle slips

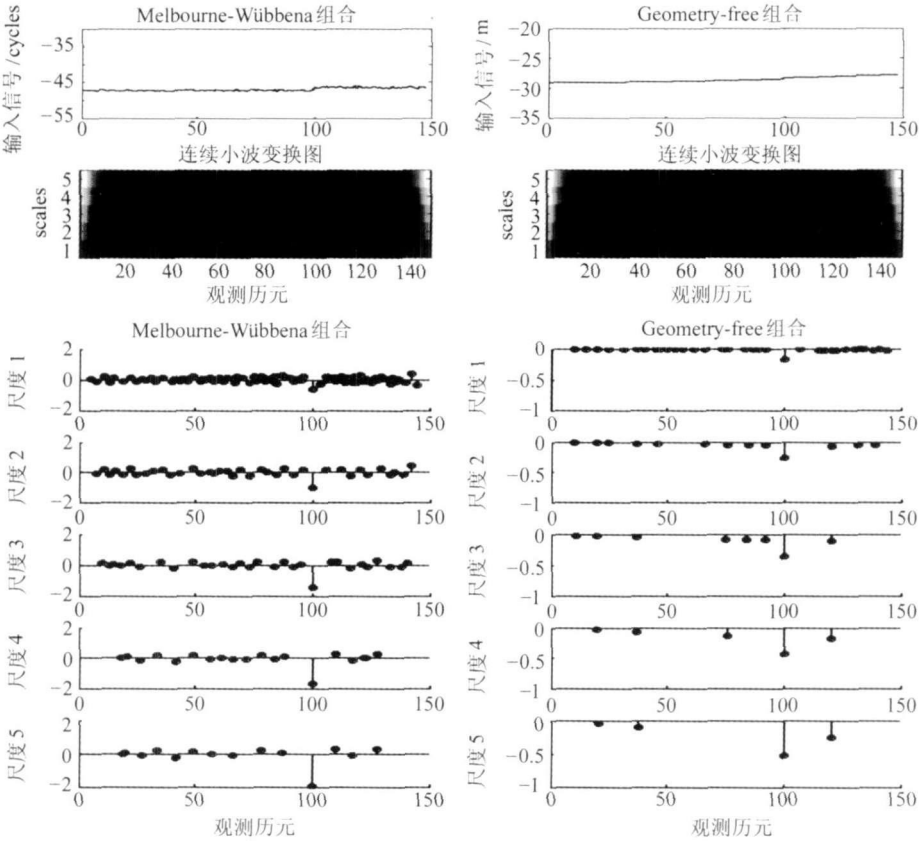


图 2 含 1 周周跳时组合观测值信号图及其小波变换图

Fig. 2 Signal and Wavelet Transform Graph with 1 Cycle slip

波对实测 GPS 观测值进行分解, 根据被分析信号的特征, 自适应地选择相应频带, 使之与信号频谱相匹配。通过一定尺度上的带通滤波器进行滤波, 就可以将特定的奇异信息部分提取出来, 而将其他部分分离出去, 从而提高了时频分辨率, 由此可以有效地检验、发现和探测周跳, 从而可以对 GPS 数据进行质量控制。与 Gipsy 软件的周跳探测方法进行对比可知, 基于小波变换的周跳探测自动化程度较高且定位准确, 当电离层变化较平稳时, 可以准确地检测 1 周左右的周跳, 从而提高 Gipsy 的算法效率。

从连续小波变换分解所得到的各尺度结果表明, 即使在有噪声信息和干扰的情况下, 仍能较好地提取信号的特征信息。在多尺度分解过程中, 尺度越大, 突变信号模的极大值变大, 噪声产生的模的极值点减少, 对信号具有消噪的作用。

参 考 文 献

[1] Lachapelle G C, Liu G, Lu B, et al. Cannon Precise Marine DGPS Positioning Using P Code and High Performance C/A Code Techniques[ C]. National Technical Meeting, Alexandria, 1993

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

[3] Hofmannr Wellen Hof B, Lichtenegger H, Collins J. Global Positioning System, Theory and Practice (5th ed. )[ M]. New York: Springer Verlag , 2001

[4] 韩保民, 欧吉坤, 柴艳菊. 用拟准检定法探测和修复 GPS 数据中的粗差和周跳[ J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(3): 245 250

[5] 刘经南, 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[ J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(3): 234 240

[6] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data[ J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3) : 199 202

[7] 贾沛璋, 吴连大. 关于 GPS 载波相位中的野值周跳与模糊度[ J]. 紫金山天文台台刊, 2000, 19(2): 106 110

[8] 柳林涛, 许厚泽. 航空重力测量数据的小波滤波处理[ J]. 地球物理学报, 2004, 47(3): 490 494

第一作者简介: 黄兵杰, 硕士生。现主要从事 GPS 快速定位和精密单点定位理论及应用研究。  
E mail: qiu jiehb j@ 126. com

Detection of Cycle-slip in the GPS Precise Point Positioning  
Based on Wavelet Transform

H U A N G B i n g j i e<sup>1,2,3</sup> L I U L i n t a o<sup>1</sup> G A O G u a n g x i n g<sup>3</sup> Z H O U J i a n<sup>3</sup>

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China)  
(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, A 19 Yuquan Road, Beijing 100039, China)  
(3 Wuhan Geotechnical Engineering and Surveying Institute, 209 Wansongyuan Road, Wuhan 430022, China)

**Abstract:** A new approach for cycle-slips detection and location based on continuous wavelet transform is proposed. GIPSY software can detect and correct the outlier and the cycle-slips using the dual-frequency GPS data, but its dependability is worth doubting in estimating the small cycle-slips. The signals are analyzed by wavelet that is the first derivative of Gaussian function, because the continuous wavelet transform (CWT) has the good character to diagnose the indiscoverable faults, the module maximum value points of signal containing noise have different trend respectively at different scales. It is showed that it can even find 0.5 or 1 cycle slip, so it can apparently improve efficiency of cycle-slips detection algorithm. An example is taken to prove the validness of the method.

**Key words:** precise point positioning; continuous wavelet transform; cycle slip

About the first author: HUANG Bingjie, postgraduate, majors in rapid GPS positioning and GPS precise point positioning.  
E mail: qiu jiehb j@ 126. com