DOI:10.14075/j.jgg.2015.04.027

文章编号:1671-5942(2015)04-0666-05

利用 EMD 阈值消噪改进 MW 组合周跳探测性能

甘　雨[1]　隋立芬[1]　戚国宾[1]　温劲杰[2]

1　信息工程大学地理空间信息学院,郑州市科学大道 62 号,450001

2　93787 部队,北京市,100076

摘　要:分析 MW 组合观测值的噪声特性,评价其实际周跳探测性能,提出利用 EMD 阈值消噪方法进行降噪。对于 EMD 的端点效应问题,在 MW 递推均值上增加虚拟噪声构成虚拟观测值对数据进行延拓。估计 MW 组合经 EMD 分解后各层分量的阈值,削弱噪声影响。分析消噪后含周跳 MW 组合所发生的变化,指出周跳具有"扩散"现象,提出基于消噪后 MW 组合的探测方案。

关键词:经验模分解;阈值;MW 组合;周跳;数据延拓

中图分类号:P228.41　　**文献标识码**:A

GPS 动态非差周跳探测一般需使用多频观测值,如无几何距离组合[1,2]、MW 组合[3]等。Blewitt 提出的 TurboEdit 算法[4]使用这两种组合观测值联合探测周跳,目前已得到广泛应用[5]。TurboEdit 算法中,MW 组合通过递推平均来估计均值和方差,由于估值需逐渐收敛,收敛前出现的周跳无法探测[6]。此外,MW 组合包含伪距观测值,其噪声远大于载波相位,受多路径效应和卫星高度角等因素的影响,可能无法探测 1～2 周的小周跳[7]。因为递推平均过程虽然能减小期望和方差估值受噪声的影响,但是 MW 观测值本身的噪声水平并没有降低。蔡昌盛[7]对本历元使用后向平滑,在其后一个历元使用前向平滑,以前后历元差作为探测检验量以减少噪声影响,但是要求后续历元用于平滑的数据一定不含周跳,降低了实际应用中的效率和自动化程度。部分学者将小波分析等用于周跳探测,但均针对原始 GPS 观测值[8-9]。在动态导航定位中,接收机的某些运动可能引起原始观测值发生类似于周跳的突变。

针对 MW 组合噪声水平较高的情况,使用经验模分解(empirical mode decomposition,EMD)阈值消噪的方法进行处理。对于 EMD 的端点效应问题,提出在 MW 递推均值上增加虚拟噪声构成虚拟观测值的方法对数据进行延拓。对 MW 组合进行分解,估计各层分量的阈值,削弱噪声影响。分析消噪前后含周跳 MW 组合所发生的变化,指出周跳具有"扩散"现象,提出基于消噪后 MW 组合的探测方案。

1　MW 组合探测性能分析

MW 组合观测值为[4]:

$$L_W = \lambda_W N_W = \lambda_W \left(\Phi_1 - \Phi_2 - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{P_1}{\lambda_1} + \frac{P_2}{\lambda_2} \right) \right) \tag{1}$$

其中,Φ 表示载波相位观测值,P 表示伪距,f 表示频率,λ 表示波长。该组合消除了几何距离和大部分误差项,仅受伪距噪声和多路径效应影响。

宽巷波长 λ_W 表达式为:

$$\lambda_W = \frac{c}{f_1 - f_2} \tag{2}$$

c 为光速,波长约为 86.2cm,相比原始 L_1 和 L_2 增加数倍。直接以下式进行分析:

$$N_W = \Phi_1 - \Phi_2 - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{P_1}{\lambda_1} + \frac{P_2}{\lambda_2} \right) = \Phi_1 - \Phi_2 - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{\lambda_W (f_1 + f_2)} \tag{3}$$

若无特别说明,这里 MW 组合观测均指 N_W。

假设两个频点的伪距精度相同(均为 σ_P),载波相位误差很小(可忽略),则 MW 组合的精度为:

$$\sigma_W = \frac{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}}{\lambda_{WL} (f_1 + f_2)} \sigma_P \tag{4}$$

单位为周。代入具体频率和宽巷波长,得:

$$\sigma_W = 0.827 \sigma_P \tag{5}$$

若以 4 倍中误差作为周跳探测的阈值,要探测 1 周的周跳,需要

收稿日期:2014-06-23

项目来源:国家自然科学基金(41274016,40974010)。

第一作者简介:甘雨,博士生,主要从事动态大地测量数据处理研究,E-mail:ganyu099@163.com。

$$\sigma_P < 0.302\ m \tag{6}$$

才能满足 $\sigma_W < 1/4 = 0.25$ 的需求。受到高度角和多路径效应影响,式(6)的条件有时难以满足,在动态条件下尤为严重。

MW 组合递推平均计算均值和方差为[4]:

$$\overline{N}_W(k) = \overline{N}_W(k-1) + \frac{1}{k}[N_W(k) - \overline{N}_W(k-1)] \tag{7}$$

$$\sigma_W^2(k) = \sigma_W^2(k-1) + \frac{1}{k}[(N_W(k) - \overline{N}_W(k-1))^2 - \sigma_W^2(k-1)] \tag{8}$$

σ_W 初值取为 0.5 周。若

$$|N_W(k) - \overline{N}_W(k-1)| \geqslant 4\sigma_W(k) \tag{9a}$$

$$|N_W(k+1) - N_W(k)| \leqslant 1 \tag{9b}$$

则认为 k 历元发生周跳。

可以看出,在周跳探测过程中,N_W 本身受到噪声和多路径效应的影响。若误差水平较高,有可能发生漏检。

图 1 显示的是某动态测站在一段时间内观测卫星 PRN10(高度角大于 55°)无周跳时的 MW 组合观测值(这里实际上是 $N_W(k) - \overline{N}_W(k-1)$,去除了均值)及其阈值。可以看出,MW 组合的噪声水平较高,分布在[−0.664, 0.598]范围内。显然,在某些历元内发生 1 周的小周跳时无法被探测。图 2 中,黑色虚线以下的部分若发生+1 周的周跳,无法探测出来;而图 3 中,黑色虚线以上的部分无法探测可能发生的−1 周的周跳。

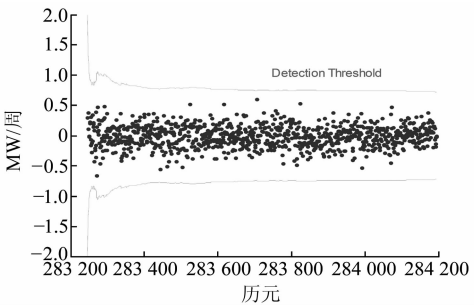


图 1　无周跳时 MW 组合及阈值
Fig. 1　MW and thresholds (0 cycle slip)

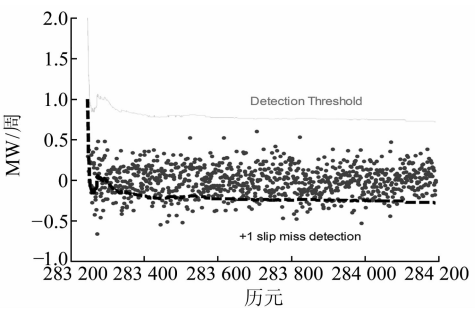


图 2　+1 周周跳时的漏检区域
Fig. 2　Miss detection area (+1 cycle slip)

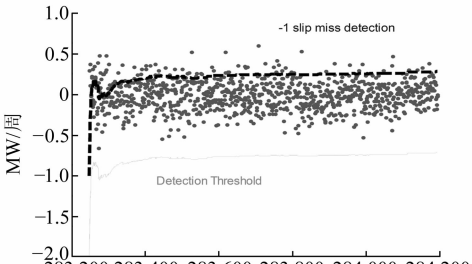


图 3　−1 周周跳时的漏检区域
Fig. 3　Miss detection area (−1 cycle slip)

如果能够降低 MW 组合观测值的噪声水平,同时合理地估计降噪后观测的均值和方差,就能探测出小周跳,减小漏检率。

2　EMD 阈值消噪 MW 组合的周跳探测

2.1　EMD 原理及端点效应的抑制

经验模分解[10]能把复杂的信号分解为一系列固有模态函数(IMF, intrinsic mode function)分量和余项之和的形式。分解出的各分量频率由高到低,每个分量为一零均值平稳信号。分解的具体过程为:

1)根据信号 $x(t)$ 的局部极大值和极小值,用三次样条曲线插值求出信号上下包络线,计算上下包络的均值 m_1,得到 $h_1 = x(t) - m_1$。检测 h_1 是否满足 IMF 的两个条件:①零点数目与极值点数目相同或最多相差 1;②局部极大值点构成的包络线和局部极小值点构成的包络线的均值为零。若满足,则 h_1 为第一个分量 imf_1。

2)若不满足,重复执行第 1 步,直至重复 k 次后 h_{1k} 满足条件,则 $\mathrm{imf}_1 = h_{1k}$,求出原始信号与 imf_1 的差值:$r_1 = x(t) - \mathrm{imf}_1$。

3)将 r_1 作为新原始信号重复上述过程,逐个提取出 n 个 IMF 分量 $\mathrm{imf}_2, \mathrm{imf}_3, \cdots, \mathrm{imf}_n$,得到余项 $r_n = r_{n-1} - \mathrm{imf}_n$。当 imf_n 或 r_n 小于预先设定的值,或 r_n 已经成为单调函数时,分解完成。信号 $x(t)$ 分解成 n 个 IMF 分量和 1 个余项的和:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{imf}_i + r_n \tag{10}$$

在分解过程中,求包络线是通过极值点进行插值拟合得到的,在样条插值时,如果数据两个端点本身不是极值点,就不能确定端点处的极值点,导致构成包络线的三次样条曲线在数据序列的两端出现发散现象,并且这种发散的结果可能会逐渐向内"污染",这就是 EMD 端点效应[11]。

如果在 MW 组合消噪过程中发生周跳,且周

跳位置发生在数据段的边缘，端点效应会对含周跳的组合观测值进行错误的分解，导致周跳被湮没。如果能对数据进行延拓，即在端点以外再增加一段虚拟观测数据，则原来发生周跳的数据处于数据中部，受端点效应的影响将大大降低，关键在于所增加的数据要和已有数据具有类似的特性。

在第 k 个历元，我们由之前 $k-1$ 个历元的数据经递推平均能够得到数据的均值 $\overline{N}_W(k-1)$ 和标准差 $\sigma_W(k-1)$，在假定 MW 组合观测符合正态分布的情况下，可以产生 n 个虚拟数据：

$$N'_W(k+1,\cdots,k+n)=\overline{N}_W(k-1)+\sigma_W(k-1)\cdot \mathrm{randn}(n) \tag{11}$$

其中，randn 产生标准正态分布的随机数组。此为向后延拓的方向，向前延拓方法类似。

2.2 EMD 阈值消噪

文献[13-14]提出了基于 Hurst 参数的阈值消噪方法。对前两个 IMF 分量的标准差采用具有抗差性的中位数来估计，以免受到周跳成分的干扰：

$$\hat{\sigma}(k)=\mathrm{median}(|\ \mathrm{imf}_k(j);\ j=1,2,\cdots,N\ |)/0.675\ 4,k=1,2 \tag{12}$$

而其他 IMF 分量的方差按下式递推计算：

$$\hat{V}(k)=\rho_H^{(2H-2)(k-2)}\hat{V}(2)=\rho_H^{(2H-2)(k-2)}\ [\hat{\sigma}(2)]^2,\ k>2 \tag{13}$$

式中，H 即为 Hurst 参数。MW 组合观测值误差可视为白噪声，即 $H=0.5$，则：

$$\hat{V}(k)=\rho_H^{-(k-2)}\ [\hat{\sigma}(2)]^2,\ k>2 \tag{14}$$

阈值估计：

$$T_k=\sqrt{V_k\cdot 2\ln N}=\sigma_k\ \sqrt{2\ln N} \tag{15}$$

可以看出，各层分量的阈值不同，EMD 阈值消噪是一种自适应阈值消噪方法。

MW 组合观测值如图 4 所示。对卫星 PRN10 的一段数据最后一个历元的 MW 组合加入+1 周周跳，分别用原始数据和数据延拓后的数据进行 EMD 阈值消噪，结果见图 5、6。可以看出，如果不对数据进行延拓，受端点效应的影响，周跳会被湮没。

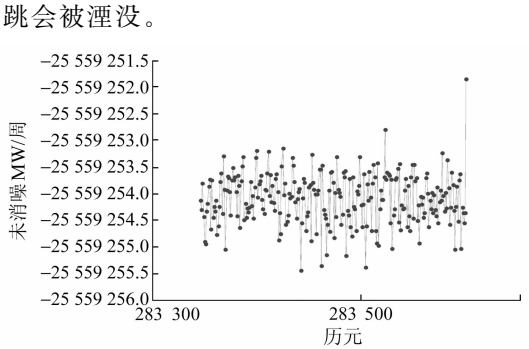


图 4 端点发生周跳的 MW 组合

Fig. 4 MW with cycle slip on the end

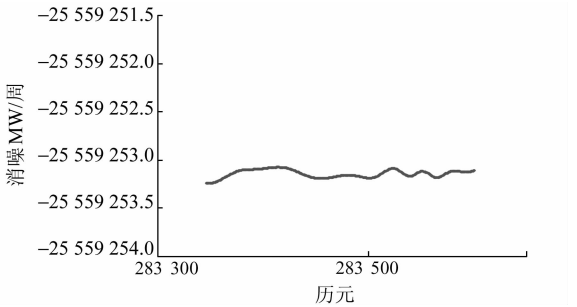


图 5 未使用数据延拓的消噪 MW

Fig. 5 De-noised MW without data extension

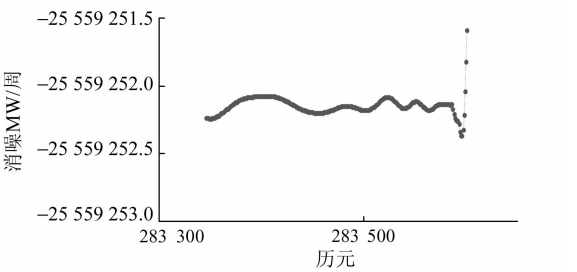


图 6 使用数据延拓的消噪 MW

Fig. 6 De-noised MW with data extension

2.3 消噪 MW 组合探测周跳

MW 组合中的观测值若发生周跳，相当于数据发生极强的突变，EMD 阈值消噪将这种突变进行平滑，让整个数据的变化更为平缓。因此，某个历元上发生的周跳经过阈值消噪后，会“扩散”到附近的历元，如图 6。图 7、8 是另一段 MW 组合观测值及其消噪的结果，周跳未发生在端点处而是发生在中间，周跳向前后两个方向扩散。

消噪后周跳的“扩散”现象对于周跳的发现是有利的。假设在 k 历元发生周跳，则对 $k-1$ 历元及之前历元的数据，采用 EMD 阈值消噪后 MW 组合未发生突变，即 $k-1$、$k-2$…等历元均无法探测到周跳；而使用包含 k 历元的数据进行消噪后，组合观测值在 k、$k-1$、$k-2$…等历元均可能超过检验阈值。这说明，使用消噪后的 MW 组合探测周跳时，不能仅以是否超过检验阈值作为定位周跳发生历元的标准，需结合前后两个历元的结果进行对比。

消噪 MW 组合进行周跳探测包括以下步骤：

1）基于递推平均过程估计的均值和方差，对 MW 组合观测值序列进行数据延拓，如式(11)所示。对于消噪后的数据，可取标准差初值为 0.2 周或更小。

2）对信号进行 EMD 分解，并进行阈值消噪。

3）对于消噪后 MW 组合超过阈值的点 i、$i+1$、$i+2$、…，由 $k=i$ 及之前一段历元的数据进行步骤 1、2，检验消噪后 k 历元结果是否超过阈值。若超出，则说明 k 历元发生周跳，将 k 历元结果用

递推平均计算的均值代替,以免影响后续探测,k 往前推进,即 $k=i+1$;若未超出,说明当前历元未发生周跳,直接令 $k=i+1$。最终使 k 遍历所有超过阈值的点。上述步骤也可由后向前递推。

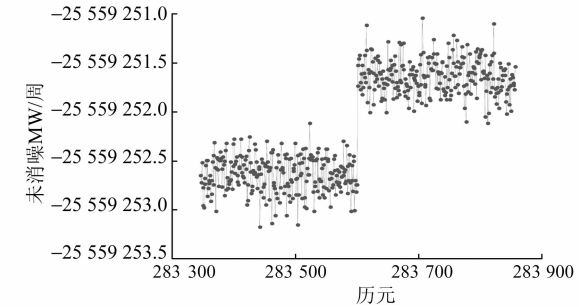


图 7　发生周跳的 MW 组合
Fig. 7　Un-de-noised MW with cycle slip

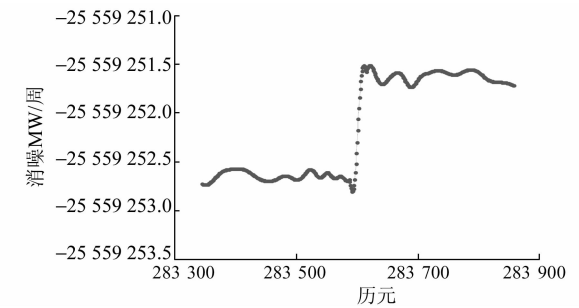


图 8　消噪后发生周跳的 MW 组合
Fig. 8　De-noised MW with cycle slip

3　计算与分析

选择 256 个历元数据进行实验,未消噪 MW 组合的误差与图 1 类似。其中,第 256 个历元的 MW 组合观测值加入 +1 周的周跳,进行 EMD 阈值消噪前均进行了数据延拓。图 9 显示的是使用前 255 个历元数据探测的结果,图 10 为 256 个历元数据探测的结果。使用少于 255 个历元的结果和图 9 类似,这里不再给出。

由上述结果可以看出:

1)经过消噪后,MW 组合观测值的噪声水平下降,最大值不超过 0.2 周,能够迅速探测出小至 1 周的周跳。

2)对数据进行数据延拓后再使用 EMD,能探

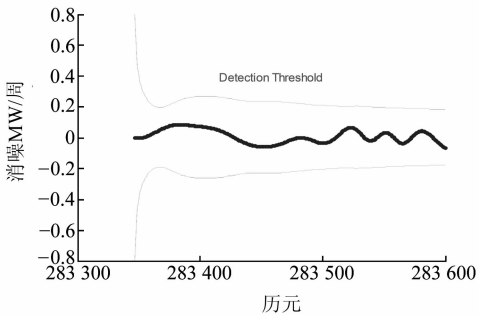


图 9　发生周跳的 MW 组合
Fig. 9　Un-de-noised MW with cycle slip

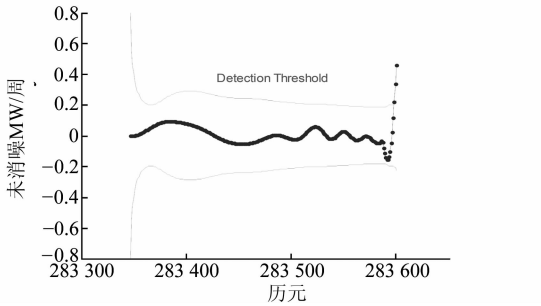


图 10　消噪后发生周跳的 MW 组合
Fig. 10　De-noised MW with cycle slip

测到位于端点处的周跳。

3)发生周跳时,若使用包含周跳对应历元的数据进行消噪并探测,其他历元也受到周跳的影响,结合使用不含周跳历元的数据方能最终确定周跳位置。

4　结　语

TurboEdit 方法无法降低 MW 组合观测值本身的噪声水平,在接收机质量不稳定、多路径效应显著等情况下容易造成漏检。使用 EMD 阈值消噪的方法能够对噪声进行降噪处理,根据噪声特性得到各层分量的阈值,削弱噪声影响,提高对周跳的辨识度。EMD 存在端点效应问题,提出在 MW 递推均值上增加虚拟噪声构成虚拟观测值的方法对数据进行延拓。进行数据延拓后,即使在端点处发生周跳,消噪后周跳特性仍然得到保留。若 MW 组合包含周跳,则消噪后观测值中的周跳具有“扩散”现象。针对这一现象提出的基于消噪后 MW 组合的探测方案,能够定位周跳发生的具体位置,增强消噪后 MW 组合探测周跳的准确性。

参考文献

[1]　方荣新,施闯,魏娜,等. GPS 数据质量控制中实时周跳探测研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 34(9): 1 094-1 098(Fang Rongxin, Shi Chuang, Wei Na, et al. Real-time Cycle-Slip Detection for Quality Control of GPS Measurements[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 34(9): 1 094-1 098)

[2]　陈品馨,章传银,黄昆学. 用相位减伪距法和电离层残差法探测和修复周跳[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2): 120-125(Chen Pinxin, Zhang Chuanyin, Huang Kunxue. Cycle Slips Detecting and Repairing by Use of Phase Reduce Pseudorange Law and Ionized Layer Remant Method of Difference[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(2): 120-125)

[3]　阳仁贵,欧吉坤,袁运斌. 一种 GPS 相位周跳分段平均组合的自动修复方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(5): 76-77(Yang Rengui, Ou Jikun, Yuan Yunbin. An Approach of Sub-Average Joint Computation for Auto Re-

storing GPS Phase Cycle Slip[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(5): 76-77)

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

[5] 吴继忠,施闯,方荣新. TurboEdit单站GPS数据周跳探测方法的改进[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011, 36(1): 29-34(Wu Jizhong, Shi Chuang, Fang Rongxin. Improving the Single Station Data Cycle Slip Detection Approach TurboEdit[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(1): 29-34)

[6] 郑作亚,程宗颐,黄城,等. 对Blewitt周跳探测与修复方法的改进[J]. 天文学报,2005, 46(2):216-225(Zheng Zuoya, Cheng Zongyi, Huang Cheng, et al. Improving of Cycle-slip Detection and Correction of Blewitt Method[J]. Acta Astronomica Sinica, 2005, 46(2):216-225)

[7] Cai Changsheng, Liu Zhizhao, Xia Pengfei, et al. Cycle Slip Detection and Repair for Undifferenced GPS Observations under High Ionospheric Activity[J]. GPS Solution, 2013, 17: 247-260

[8] 蔡昌盛,高井祥. GPS周跳探测及修复的小波变换法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2007, 32(1): 39-43(Cai Changsheng, Gao Jingxiang. Cycle-slip Detection and Correction of GPS Data by Wavelet Transform[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(1): 39-43)

[9] 李明然,田林亚,热比亚. 小波和Kalman滤波组合在GPS周跳探测与修复中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(4): 76-79(Li Mingran, Tian Linya, Rebiya. Application of Wavelet and Kalman Filtering Combination in GPS Cycle Slip Detection and Restoration[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(4): 76-79)

[10] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Nonstationary Time Series Analysis[J]. Proceedings of the Royal Society: A, 1998, 1971, 454: 903-993

[11] 曹冲锋,杨世锡,杨将新. 一种抑制EMD端点效应新方法及其在信号特征提取中的应用[J]. 振动工程学报,2008, 21(6): 588-594(Cao Chongfeng, Yang Shixi, Yang Jiangxin. A New Method for Restraining the End Effect of Empirical Mode Decomposition and its Applications to Signal Feature Extraction [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(6): 588-594)

[12] Huang N E, Shen S S P. Hilbert-Huang Transform and Its Applications[M]. Singapore: World Scientific, 2005

[13] 甘雨,隋立芬,王冰. 经验模态分解阈值消噪方法及其在惯性导航系统数据处理中的应用[J]. 测绘学报,2012, 41(4): 504-510(Gan Yu, Sui Lifen, Wang Bing. EMD Threshold De-Noising and Its Applications in INS Data Processing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(4): 504-510)

[14] Gan Yu, Sui Lifen. An EMDThreshold De-Noising Method for Inertial Sensors[J]. Measurement, 2014, 49:34-41

Improving the Performance of MW Combined Observation on Cycle Slip Detection Using EMD Threshold De-Noising

GAN Yu[1] *SUI Lifen*[1] *QI Guobin*[1] *WEN Jinjie*[2]

1 School of Geography Spatial Information, Information Engineering University, 62 Kexue Road, Zhengzhou 450001, China

2 Troop 93787, Beijing 100076, China

Abstract: The noise level of MW combination is sometimes high, causing the possibility of miss detection when using the TurboEdit algorithm. The noise property of MW is analyzed and the actual ability of cycle slip detection is evaluated. The EMD threshold de-noising method is proposed to reduce noise level of MW. To deal with the end effect of EMD, the data to be decomposed is extended by a set of data, which is formed by adding virtual noise on the time average value of MW. The thresholds of the IMFs generated by EMD of MW are estimated and used to threshold the noise. The new characteristic of de-noised MW with cycle slip is analyzed. It is found that the cycle slip will spread to neighboring data and a detection scheme based on the de-noised MW is proposed.

Key words: EMD; threshold; MW combination; cycle slip; data extension

本刊编委金双根首次提出大气地震学概念

据《中国科学报》报道,中科院上海天文台金双根团队在电离层地震学领域取得重要进展,在国际上首次提出大气地震学概念,相关研究成果近日发表于《地球科学评论》。在这项研究中,科研人员模拟结果给出了地震电离层扰动特性,即产生的声波重力波靠近震中,而表面瑞利波和海啸在大气/电离层中分别产生声波和重力波。这些由固体地球/海洋和大气耦合产生的波向周边和上空传播,引起电离层等离子扰动。但由于真正前震、同震和余震电离层扰动信号很难分离,特别是震前大气异常仍存争议,大气和地震耦合机制还有待进一步研究。为此,金双根提出,利用大气探测手段,进一步研究和认识地震破裂前后细节和产生机理,发展GNSS大气地震学,共同解决地震监测和预测难题。