

# 基于小波分析的GPS动态变形数据粗差识别模型研究

李喜盼<sup>1</sup>, 扈静<sup>2</sup>, 李海刚<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学 资源学院, 河北 邯郸 056038; 2. 邯郸市水利工程处, 河北 邯郸 056001; 3. 北京则泰集团公司, 北京 100107)

## Research on Model of Gross Error Identification for GPS Dynamic Deformation Data Based on Wavelet Analysis

LIXipan, HU Jing, LIHagang

**摘要:** 基于小波基函数的性质, 结合含有少量粗差的GPS形变信号实例, 研究粗差特征在小波变换后的不同尺度上的表现规律及粗差位置的确定方法。分析在动态监测数据粗差识别过程中正则性和分解层数对粗差表现的影响, 为选择合适的小波函数进行粗差识别提供一定的依据。

**关键词:** 小波分析; 动态变形; 粗差识别; 建模

### 一、引言

随着3S技术的发展, GPS监测技术被广泛地应用于动态变形监测, 其数据处理模型也得到了快速发展。但由于受到多路径、大气、接收机噪声、卫星轨道等影响, 干扰信号较多, 解算的形变信息中会有大量噪声和少量粗差存在, 监测数据往往达不到要求的监测精度。

随着变形监测传感器的发展, GPS变形监测数据也发生了根本性变化: 变形数据源的采样频率大幅提高, 数据量膨胀, 蕴涵信息频段加宽。但由于传感器采集数据受各种因素的影响, 常常导致在变形信息数据中存在不同类型的粗差, 如孤立态、离散态和区域态等, 而粗差的存在不利于测量数据分析。目前常见的粗差探测法有 Chauvenet 准则、Grubbs 准则、Dixon 准则、 $t$  分布准则<sup>[1]</sup>、数据探测法、选权迭代法<sup>[2]</sup>, 但使用这些方法的前提是假设数据为正态分布, 计算较繁琐, 不利于实际应用。

小波分析具有低通滤波的功能, 能对原始信号有效分频, 从而在不同尺度上将粗差和噪声分开, 达到识别的目的。通过小波变换的多尺度分析, 反映形变信号的内在特征, 并分离形变趋势项。与传统的分析方法相比, 小波分析具有独特的优势, 它采用 Mallat 多尺度分解算法<sup>[3]</sup>分析形变信号中可能的粗差点位置。但是在实际应用中, 通常由于无法区分真实的信号和噪声, 而且可用于粗差定位的小

波基函数是一个集合, 因此在小波粗差定位的实际应用中采用哪一种小波函数才有最好的定位效果, 是一个有待解决的、同时很有实际价值的研究课题。

本文采用含孤立态、离散态与区域态三种类型粗差<sup>[4-7]</sup>的含强噪声的GPS动态变形信号, 评估用不同性质的小波函数进行粗差定位的能力, 并得出在粗差定位和识别中选择小波基函数的一些基本依据。

### 二、小波基本理论

#### 1 小波变换

对于  $\phi(t) \in L^2(R)$  ( $L^2(R)$  表示可平方、可积的实数空间, 即能量有限的信号空间), 如果其傅里叶变换  $\hat{\phi}(\omega)$  满足允许条件<sup>[2]</sup>

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{\phi}(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < +\infty \quad (1)$$

式中,  $\phi(t)$  为基本小波或小波母函数。且  $\phi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi(\frac{t-b}{a})$  是基小波经伸缩和平移后得到的连续小波序列, 则信号  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变换, 可以定义为<sup>[2]</sup>

$$W_{\phi} f(a, b) = \langle f(t), \phi_{ab} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\phi(\frac{t-b}{a})} dt \quad (2)$$

式中,  $a$  为伸缩因子或尺度因子;  $b$  为时间因子或平移因子;  $\overline{\phi_{ab}(t)}$  是  $\phi_{ab}(t)$  的复共扼函数。

#### 2 小波分解和重构

若尺度函数  $\phi(t) \in V_0$  是标准正交函数, 有小

波变换的  $j+1$  层系数  $\{c_k^{j+1}; k \in Z\}$ , 通过分解滤波器系数  $\{h_n, n \in Z\}, \{g_n, n \in Z\}$ , 获得  $j$  层系数的分解式为<sup>[2]</sup>

$$\left. \begin{aligned} c_n^j &= \langle f^j, \phi_{j,n} \rangle = \sum_k c_k^{j+1} h_{k-2n} \\ d_n^j &= \langle f^j, \psi_{j,n} \rangle = \sum_k c_k^{j+1} g_{k-2n} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

通过重构滤波器  $\{\tilde{h}_n\}, \{\tilde{g}_n\}$ , 重构  $j+1$  层的小波系数为

$$c_k^{j+1} = \sum_n c_n^j \tilde{h}_{k-2n} + \sum_n d_n^j \tilde{g}_{k-2n} \quad (4)$$

设形变信号中最高频率为  $\omega$ , 则  $j$  步 Mallat 分解的低频频段为  $0 \sim 2^{-j}\omega$ , 高频频段为  $2^{-j}\omega \sim 2^{-j+1}\omega$ .

### 三、仿真试验

本文对含强噪声 1200 个历元的 GPS 动态形变监测数据加入粗差, 第 161~180 历元强制为 20 mm 区域态粗差; 600 历元和 605 历元强制为 30 mm 的离散态粗差; 900 历元强制为 30 mm 孤立态粗差, 得到

的强干扰形变数据图像如图 1 所示。以下从正则性和分解层数两个方面对粗差识别的影响进行分析。

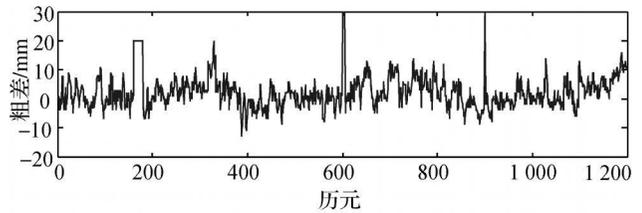


图 1 含有粗差的信号

#### 1 正则性对粗差识别的影响

正则性一般用来刻画函数的光滑程度, 正则性越高, 函数的光滑性越好。小波基的正则性主要影响小波系数重构的稳定性, 通常对小波要求一定的正则性是为了获得更好的重构信号。小波基函数的正则性是小波基函数逼近光滑性的量度, 正则性越好收敛越快。dbN 小波的正则性随着序号  $N$  的增加而增大, 下面对含粗差的信号用 db2 小波、db3 小波、db4 小波、db5 小波进行 6 层分解, 如图 2 所示。

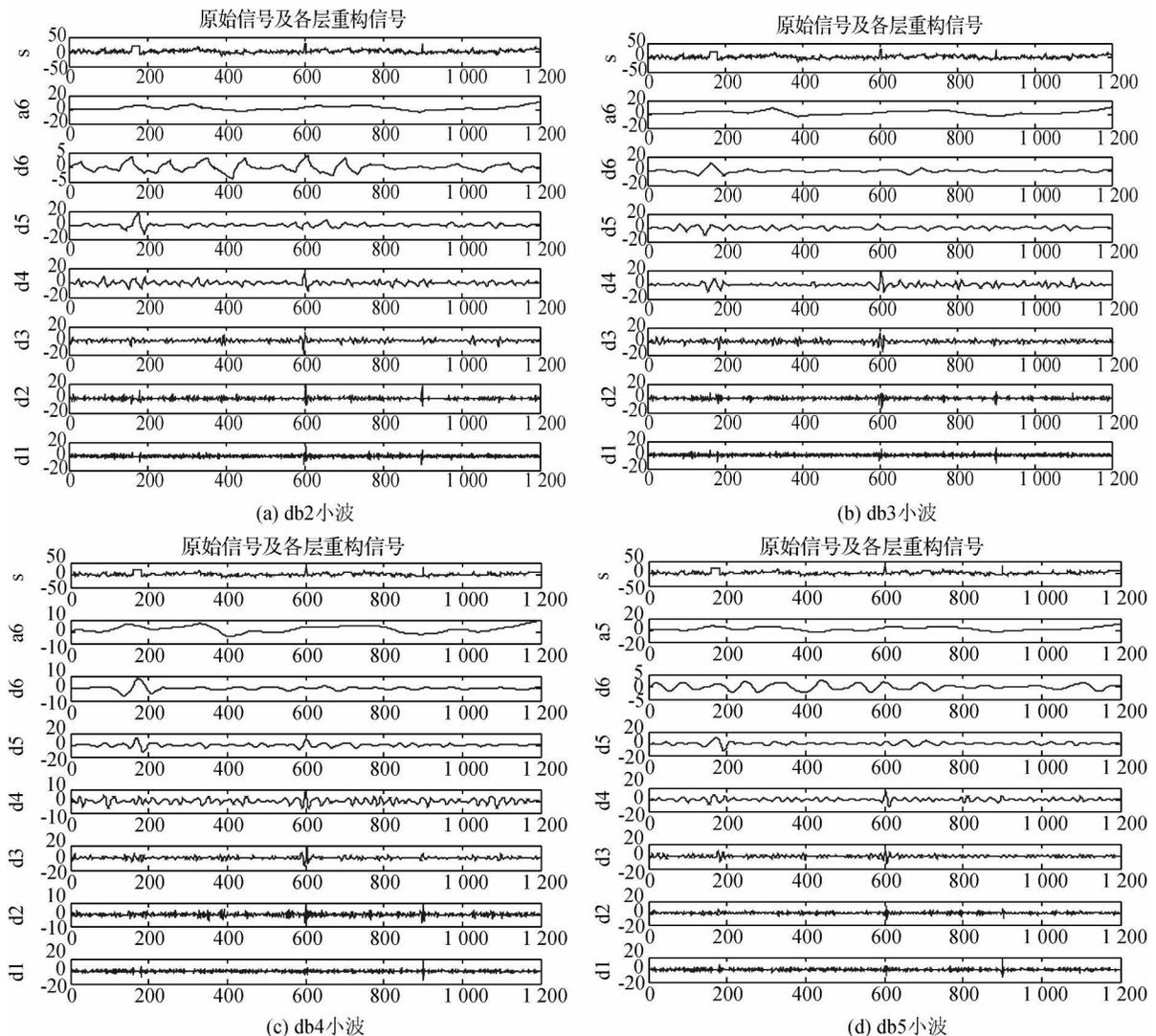


图 2 不同正则性的小波函数对含噪声信号进行 6 层分解

由图2可以看出,对于具有正则性的db2、db3、db4和db5小波,随着正则性的增加,收敛加快。比较图2(a)~图2(d)可以看出,它们都可以较清晰地识别出区域状态的粗差,但是所在层不同,db2和db5小波分解图像在d5层;db3和db4小波分解图像在d6层。图2(d)中,由于对信号的分解过于光滑,原始信号的损失较严重,可以看出db2小波对区域态粗差的时间分辨率较高。离散态粗差点在4种小波分解中都有体现,主要集中在d2层、d3层和d4

层,且识别能力相当;而对于孤立态粗差,在以上的db2小波、db3小波、db4小波分解图像中都有比较明显的体现,且db2小波最清晰。综合分析4种小波函数对3种粗差的识别效果,可以认为db2小波对粗差的识别效果最好。

## 2 不同分解层数对粗差识别的影响

选择具有较好正则性的db2小波函数对含粗差的信号进行3层、4层、5层、7层分解,分解图像如图3所示。

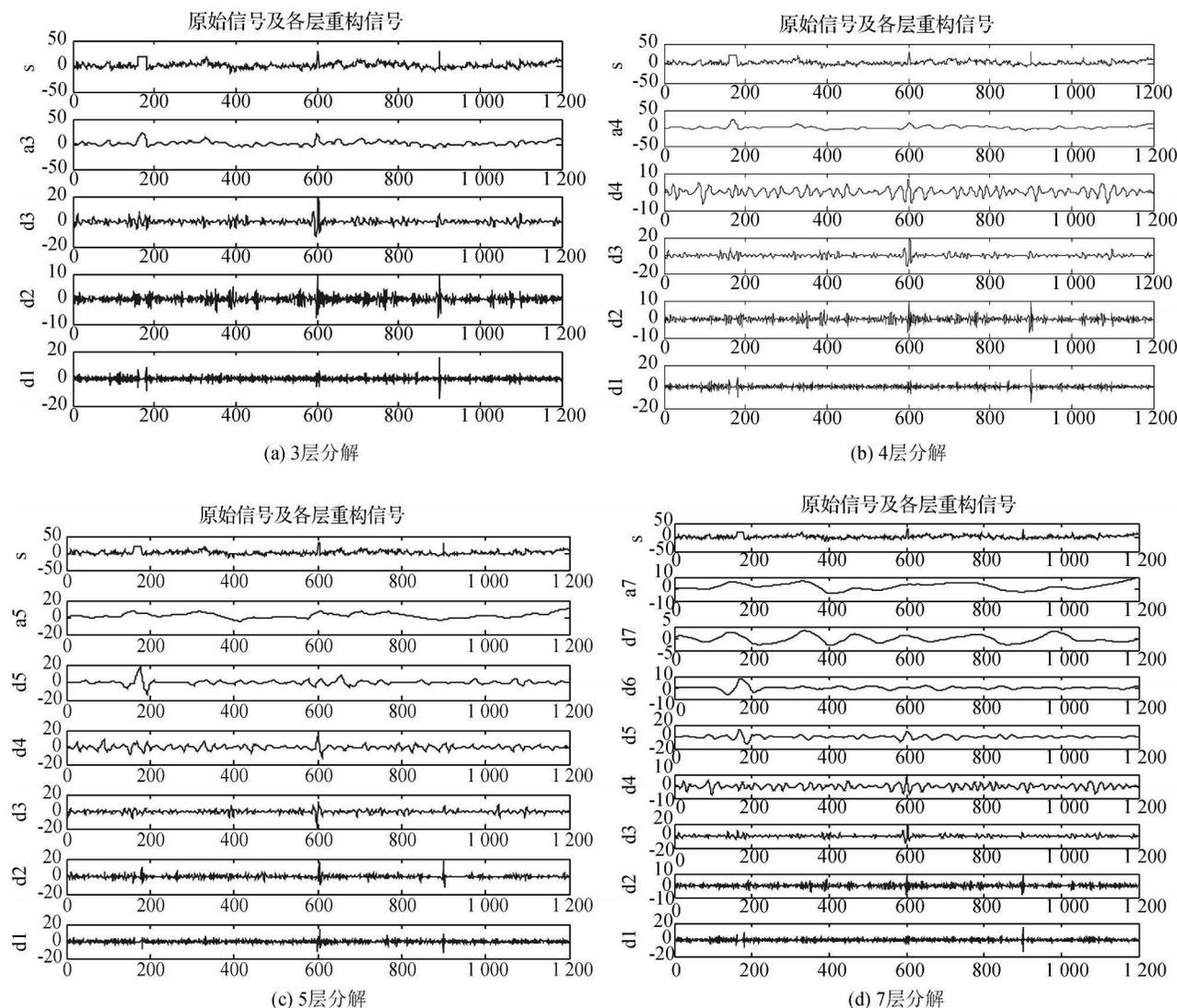


图3 db2小波对含粗差信号进行不同层数的分解

比较图3中3层、4层、5层、7层分解及图2(a)中db2函数的6层分解,高频部分d1层都可认为主要是由噪声构成,对于图3(a)和图3(b)的近似部分a3和a4还含有一些高频信息,不能很好地体现信号的趋势项,且对粗差的时间分辨率很低。综合考虑趋势信号识别的效果以及各层高频信号的可分性,最终认为db2小波的5层分解,不仅能体现不

同类型粗差的位置,而且时间分辨率较高。

## 四、结束语

通过试验可以看出,在db2小波5层分解中,d2、d3、d4、d5层都部分地检测出了粗差的位置,d5层能清晰地看出区域态粗差的存在,时间分辨率较

(下转第31页)

由式(4)及式(5)可得距离差为

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= |D_{A(1,2)} - D_{B(1,2)}| \\ \Delta_2 &= |D_{A(3,4)} - D_{B(3,4)}| \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

取式(6)中的最大者为最后结果,即

$$\Delta = \max(\Delta_1, \Delta_2) \quad (7)$$

由式(7)计算出的  $\Delta$  应满足限差要求。

### 3 T形法

T形法是由德国德累斯顿技术和经济高等专业学院的 Wehmann 教授提出,检测场地如图3所示。扫描站与目标点的坐标为已知,用高精度全站仪或其他设备进行确定。目标点1和目标点2用来检测扫描仪的距离测量部分;目标点3和目标点4用来检测扫描仪的角度测量部分。

如果扫描站与目标点的坐标为未知,则检测原理与前述的“交叉双边法”类似,需要首先将 TLS 架设在目标点1处对目标点2~4进行扫描;然后再将 TLS 架设在图3中的位置,对目标点2~4进行扫描。依据“交叉双边法”计算出需要结果。

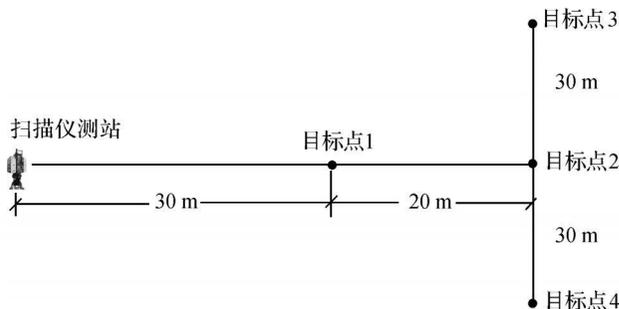


图3 T形法检测场示意图<sup>[3]</sup>

文献[3]给出了一个采用T形法检测瑞士徕卡

公司 ScanStation2的例子,如表1所示。

表1 采用T形法检测 ScanStation2的结果<sup>[3]</sup>

测量参数	目标点号	已知距离 /m	实际距离 /m	距离差 /mm
距离	1	24.007	24.005	2
	2	47.989	47.987	2
角度	3	60.070	60.068	2
	4	59.482	59.481	1

## 四、结束语

虽然国外公认三维激光扫描技术是继GPS导航技术之后测绘仪器领域的又一个里程碑式的技术进步,有许多专家学者对三维激光扫描仪的检定检测方法进行了详细研究,但国内对此的研究几乎还是空白。吸取国外成熟的检定/检测方法并依此建立相应的检定方法是迅速填补空白,并满足广大用户需求的一条捷径。

## 参考文献:

[1] 国家质量技术监督局. 通用计量术语及定义解释[M]. 北京:中国计量出版社, 2001.

[2] GOTTWALD R. Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS): A Contribution to a Future ISO Standard[C] // FIG Working Week 2008. Stockholm: [s.n], 2008: 1-14.

[3] WEHMAN W. Feldprüfverfahren Für Terrestrische Laserscanner[EB/OL]. 2010-09-10 http // www. geomatik-hamburg.de/tls/tk2009/imagines/05\_tk2009\_Wehmann.pdf

(上接第9页)

高,但离散态粗差和孤立态粗差不能识别,说明区域态粗差在低频段更易识别;离散态粗差主要集中在 d2、d3、d4 这3层,并且时间分辨率很高;孤立态粗差在 d2 层得到体现,而且相当突出,孤立态粗差点在 d3、d4、d5 层却无法识别,说明孤立态粗差在高频段更易识别。本文提出的模型通过分析正则性和分解层数对粗差表现的影响,为选择合适的小波函数进行粗差识别提供了一定的依据。

## 参考文献:

[1] 梁晋文,陈林才,何贡. 误差理论与数据处理[M]. 北京:中国计量出版社, 1989: 66-69.

[2] 刘大杰,陶本藻. 实用测量数据处理方法[M]. 北京:测绘出版社, 2003: 30-34.

[3] 王坚,高井祥,孙祥中,等. GPS单历元形变信号的小波降噪[J]. 测绘科学. 2004, 29(1): 24-25.

[4] 胡绍林,孙国基. 靶场外测数据野值点的统计诊断技术[J]. 宇航学报, 1999(2): 68-73.

[5] BERNETT V, LEWIS T. Outliers in Statistics Data[M]. New York: John Wiley Press, 1978: 36-41.

[6] HAMPEL F R, DKON W J, ANSCOMBE F J. Robust Statistics approach Based on Influence[M]. New York: John Wiley Press, 1986: 28-36.

[7] YANG Y X. Robust Estimation for Dependent Observation[J]. Manuscr Geod, 1994(19): 10-17.