

文章编号: 2095-4980(2014)01-0103-05

IGS 连续运行参考站高程时间序列功率谱分析

周 亚¹, 王立峰¹, 张思慧², 赵 刚², 张恒璟²

(1.中国人民解放军 95937 部队, 辽宁 阜新 123000; 2.辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为提高 GPS 数据的精确度和可靠性, 采用最小二乘平差原理、最小二乘平差的 3 倍单位权中误差限差准则和稳健估计粗差探测的四分位距(IQR)准则, 对数据进行粗差探测、剔除、分类处理与比较, 并基于 MATLAB 平台采用时间序列拟合模型与谱分析法对我国国际 GNSS 服务组织(IGS)站的高程分量数据进行研究。通过对北京房山站高程数据的研究可以看出, GPS 点位高程分量的时间序列的残差序列近似于正弦函数, 周期近似为 1 年, 振幅为 0.03, 高程分量数据不仅存在很明显的线性趋势, 而且存在较明显的周期特性。表明最小二乘原理、误差限差和 IQR 准则可以很好地体现高程数据的线性特征、周期特征及残差谱特征。

关键词: 连续运行参考站; 高程时间序列; 快速傅里叶变换; 功率谱

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201401.0103

Power spectrum analysis on height time series of IGS continuously operating reference station

ZHOU Ya¹, WANG Li-feng¹, ZHANG Si-hui², ZHAO Gang², ZHANG Heng-jing²

(1.95937 Units of the PLA, FuXin Liaoning 12300, China; 2.Surveying and Geographical Science, Liaoning Technical University, FuXin Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and reliability of GPS data, a method based on the least squares adjustment principle, the least squares adjustment with three times the unit weight error tolerance criteria and robust estimation of gross error detection Inter Quartile Range(IQR) criteria is proposed to detect, eliminate, classify and compare the data in gross error. And time series fitting model and spectral analysis are used to study the elevation components data of the International GNSS Service(IGS) station in the MATLAB platform. By studying the elevation data of Beijing Fangshan station, we can see that the residuals time series of GPS point elevation component are similar to the sine function, of which the period is approximately 1 year, with an amplitude of 0.03. Elevation components from the image data analysis present an obvious linearity, as well as a periodicity, which demonstrates that the principle of least squares, error tolerance and IQR criteria can well reflect the linearity, periodicity and residual spectral features of the elevation data.

Key words: continuously operating reference stations; elevation time series; Fast Fourier Transform; power spectrum

目前, 国际 GNSS 服务组织(IGS)连续运行参考站的研究与应用是地球观测与导航领域的研究热点。自从我国连续运行卫星定位服务综合系统(Continuous Operational Reference System, CORS)基准站加入 IGS 网络观测以来, 已经获取了大量的高精度连续观测数据, 使基准站高程坐标分量的运动特性分析成为可能。国内外有许多专家和学者对于 IGS 连续运行参考站高程数据进行了研究。国内, 张恒璟等人提出用抗差最小二乘估计和功率谱估计方法处理高程时间序列^[1]; 国外, Heang 等人用 ARMA 和 Kalman 模型对高程数据进行滤波^[2]。采用他们的方法处理时间序列, 得到的函数都能很好地体现出高程数据与时间之间内在的函数关系。但对于高程数据为什么表现出年周期性和半年以及它们是如何影响精确度的, 目前, 国内对这方面的研究还很少。随着航天、数字

收稿日期: 2013-03-08; 修回日期: 2013-04-09

基金项目: 国家基础测绘基金资助项目(50474032); 地心坐标系推广应用; 辽宁工程技术大学优秀青年基金资助项目(09-259)

城市和国防等对高程数据精确度日益增长的需求,如何提高高程数据精确度就显得十分重要。要想提高高程数据精确度,首先需找到高程精确度受何种因素的影响以及其是如何影响精确度的,这具有积极的实际价值和重要的实际意义。与其他的数据处理方法相比,最小二乘平差原理、最小二乘平差的 3 倍单位权中误差限差准则和稳健估计粗差探测的四分位距(IQR)准则不仅能很好地体现高程时间序列的内在函数关系,而且可以通过数据拟合和残差功率谱分析,找出影响高程数据精确度的因素,为如何提高数据精确度提供依据。本文通过运用我国 IGS 连续运行参考站北京房山(bjfs)高程分量的时间序列数据,用最小二乘法分别对建立的线性拟合和周期拟合模型进行数据处理,并用 MATLAB 实现将线性拟合和周期拟合模型剔除粗差后的数据与拟合后的数据进行对比,拟合后线性与周期的残差图像进行对比,将线性拟合和周期拟合后残差的功率谱图像进行对比,并计算出高程分量的站坐标和速度场以及周期项的值^[3-7]。这项研究对于全球定位系统(GPS)技术在地球自转、大陆构造变形、板块运动、地震监测等方面的高精确度应用有着十分重要的意义,也是当前研究的一项重要课题。

1 时间序列拟合

1.1 线性拟合

将我国 IGS 测站高程时间序列数据进行粗差剔除,用最小二乘法对剔除后数据进行线性拟合,得出残差序列^[8-11]。给定一组数据 $(x_i, p(x_i))$, $i = 0, 1, 2, \dots, m$, 做线性拟合:

$$p(x) = a + bx \quad (1)$$

式中: a 是线性拟合的初始值(高程初始值); b 是线性拟合的线性速度。

均方误差可以表示为:

$$Q(a, b) = \sum_{i=1}^m (p(x_i) - \mu_i)^2 = \sum_{i=1}^m (a + bx_i - \mu_i)^2 \quad (2)$$

式中 μ_i 为 $\{x_i\}$ 的均值。

$Q(a, b)$ 是二元函数, $Q(a, b)$ 的极小值要满足:

$$\frac{\partial Q(a, b)}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^m (a + bx_i - \mu_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q(a, b)}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^m (a + bx_i - \mu_i) x_i = 0 \quad (4)$$

整理得到拟合曲线满足的方程:

$$\begin{cases} ma + \left(\sum_{i=1}^m x_i \right) b = \sum_{i=1}^m \mu_i \\ \left(\sum_{i=1}^m x_i \right) a + \left(\sum_{i=1}^m x_i^2 \right) b = \sum_{i=1}^m x_i \mu_i \end{cases}, \text{ 或 } \begin{pmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m \mu_i \\ \sum_{i=1}^m x_i \mu_i \end{pmatrix} \quad (5)$$

式(5)为线性拟合的法方程,用消元法或克莱姆法则解出法方程:

$$a = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^m \mu_i & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i \mu_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 \end{vmatrix}}} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i \sum_{i=1}^m x_i^2 - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m x_i \mu_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m x_i \right)^2} \quad (6)$$

$$b = \frac{m \sum_{i=1}^m x_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m x_i \right)^2} \quad (7)$$

由拟合图像(图 1)可知,已经剔除了数据中变动较大的数据,高程时间序列具有线性趋势,并随时间的增加而逐渐上升。基于 MATLAB 平台用最小二乘拟合的方法剔除趋势项,可得初始值为 $a=87.440\ 54\ m$, 线性速度为 $b=0.002\ 64\ m/a$ 。由线性拟合后的残差图像(图 2)可以看出,残差值还具有波动性,波形近似于正弦信号,由此可

推知, 高程时间序列的残差还具有周期性。

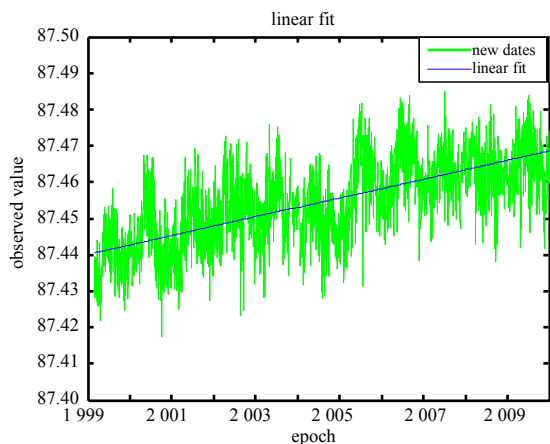


Fig.1 Liner fitting image
图 1 线性拟合图像

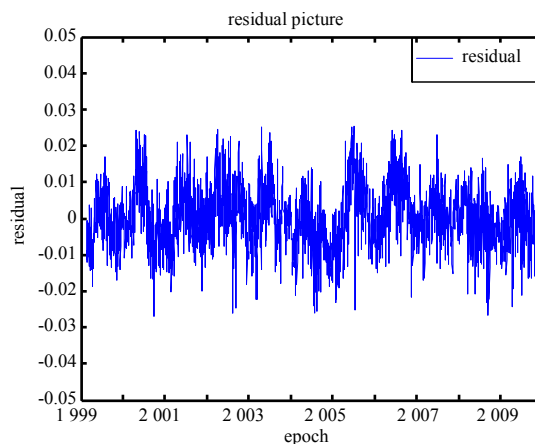


Fig.2 Residual image after liner fitting
图 2 线性拟合后残差图像

1.2 周期拟合

当系统的条件未知, 而仅对实际发生的周期因素建立拟合模型时, 结果的准确性完全取决于模型的合理性, 并经常为预测结果所验证, 属于动态的预测模型^[12]。

首先, 剔除北京房山站的原始高程时间序列数据中的粗差。然后, 对处理后数据利用最小二乘原理进行周期拟合, 周期拟合模型为: $y = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i)$, 其中 t_i 是以年为单位的时间, $i = 1, 2, 3, \dots, N$, c, d 是年周期项系数, e, f 是半年周期项系数。年周期项振幅为 $A_1 = \sqrt{c^2 + d^2}$, 半年周期项振幅为 $A_2 = \sqrt{e^2 + f^2}$ 。年周期项相位为 $\phi_1 = \arctan(d/c)$, 半年周期项相位为 $\phi_2 = \arctan(f/e)$ 。此周期拟合模型可以剔除线性趋势和主周期项, 对于其他影响因素的分析有重大意义。

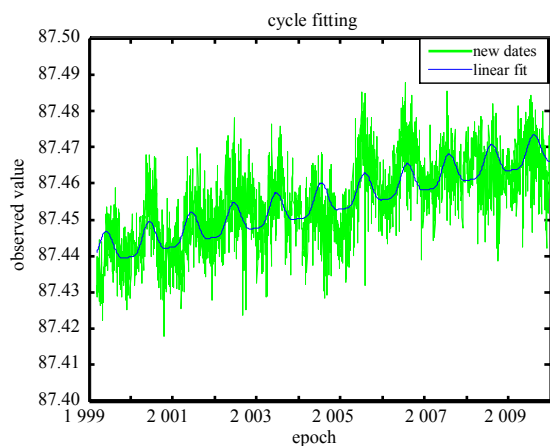


Fig.3 Period fitting image
图 3 周期拟合图像

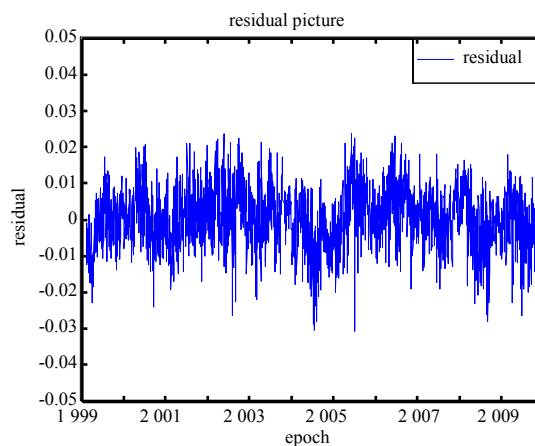


Fig.4 Residual image after period fitting
图 4 周期拟合后残差图像

图 3 是剔除粗差后数据图像及利用最小二乘原理生成的拟合后的图像, 由此可知, 高程时间序列数据具有明显的波动性和周期性, 并可以估计周期近似为一年。图 4 是周期拟合后得出的残差图像, 可见数据的趋势项已被剔除, 周期项已不存在, 但还存在一定的波动性。这是由于此拟合模型为假设模型, 具体周期不确定, 不能完全剔除, 另外也可能受其他地球物理因素影响。由 MATLAB 程序运行后, 得出 $a=87.440\ 32\ m$, $b=0.002\ 67\ m/a$, $c=0.004\ 10\ m$, $d=0.001\ 08\ m$, $e=0.000\ 67\ m$, $f=-0.001\ 01\ m$, 则 $A_1=0.000\ 017\ 981\ m$, $A_2=0.000\ 001\ 473\ m$, $\phi_1=0.256\ 599\ 555\ rad$, $\phi_2=-0.983\ 266\ 718\ rad$ 。由数据可知年周期项比半年周期项明显, 即年周期项是主要影响因素。

2 残差谱分析

这里主要采用经典谱分析的直接法和间接法, 即利用快速傅里叶变换对残差序列进行谱分析。

2.1 线性拟合残差谱分析

通过对北京房山站数据进行快速傅里叶变换及对线性拟合模型的残差序列进行功率谱分析,可以看出, GPS 点位高程分量的时间序列的残差序列近似于正弦函数,周期近似为 1 年,振幅为 0.03。由此可知,周期变化是影响 GPS 高程精确度的主要原因之一。

由线性拟合功率谱(图 5)可知,此残差序列具有很明显的长周期项,还有一些其他的短周期项,长周期项较突出,短周期项不明显。

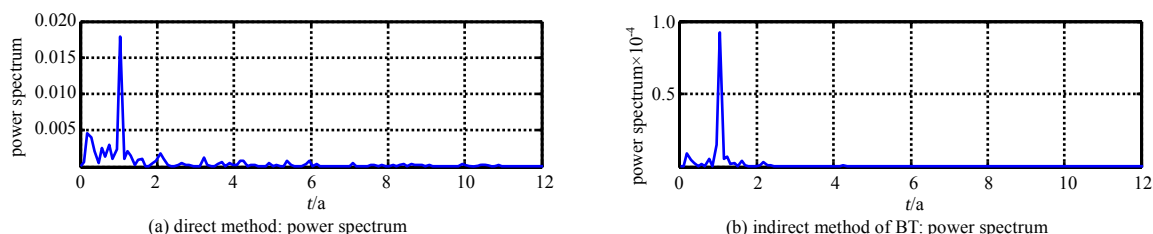


Fig.5 Linear fitting power spectrum image

图 5 线性拟合功率谱图像

2.2 周期拟合残差谱分析

由于具体周期表示法不确定,因此不能准确确定周期的大小,使长周期项继续存在,在周期拟合之后,功率谱图像仍存在较多的周期变化,且变化较明显,由间接法谱图像分析可知,间接法图像更加平滑,较直接法易总结谱的规律。高程方向的长周期项比短周期项要明显,但短周期项较长周期项多。

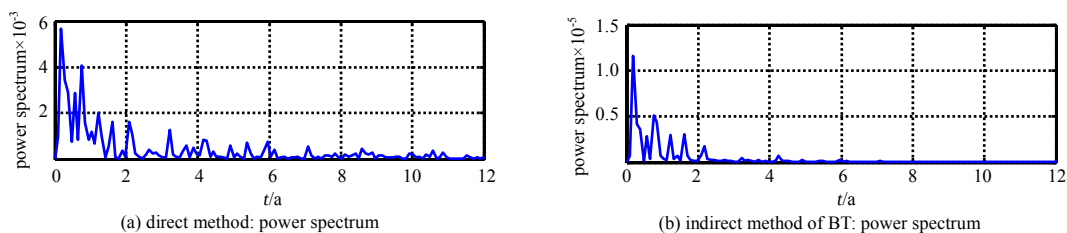


Fig.6 Period fitting power spectrum image

图 6 周期拟合功率谱图像

由图 5 和图 6 功率谱图像可知,用间接法作出的功率谱图像比直接法更加平滑。用周期图(包括平滑后的周期图)作为功率谱估计的方法可利用 FFT 进行计算,因而有计算效率高的优点,在谱分辨率要求不高的地方常用这种周期图法进行谱估计。但它有一个主要缺点是频率分辨率低,这是由于周期图法在计算中把观察到的有限长的 N 个数据以外的数据认为是零的缘故。

3 结论

1) 由原始数据图像可知, GPS 跟踪站的时间序列有整体上升的趋势,并呈波动形状,即在高程方向存在线性变化和周期性变化。

2) 由线性拟合处理后数据可知,线性运动的变化率较小,并且高程方向的运动呈现波动性。可以推断,这种现象是由诸多地球物理因素引起的。

3) 由周期拟合处理后数据,高程方向运动呈现的波动性可知,此数据表现出具有一定的年周期性。可以推断,这种现象是由诸多地球物理因素引起的,但具体影响因素还不确定。

4) 通过快速傅里叶变换(FFT)对残差的处理可知, GPS 高程分量的时间序列存在周年和半周年的周期运动项,并且周年项比半年项更明显。

5) 由谱分析方法的直接法与间接法的图像对比可知,间接法图像更加平滑,较直接法易总结谱的规律。这 2 种谱估计方法计算效率较高,但是频率分辨率较低。

6) 随着 CORS 研究的深入、科技的进步和社会需求的增强, CORS 将会有更大的发展,将为社会和国民经济建设以及其他方面的研究提供更多的服务,有更广泛的发展前景。

由此,可以根据时间序列数据,总结时间序列的变化趋势,从而对各领域涉及的时间序列问题进行预报和预测。谱估计问题的研究,无论是从认识一个随机信号或是从其他方面来讲都是重要的,因此对谱估计方法的研究

是一个值得关注和重视的课题。

参考文献:

- [1] 张恒璟,程鹏飞,郭英. 我国 IGS 基准站高程时间序列抗差功率谱估计[J]. 测绘科学, 2012,37(3):52-53. (ZHANG Hengjing, CHENG Pengfei, GUO Ying. Robust power spectrum estimation on height time series of Chinese CORS stations[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012,37(3):52-53.)
- [2] Schuh H, Estermann G, Crétau J F, et al. Investigation of Hydrological and Atmospheric Loading by Space Geodetic Techniques[J]. International Association of Geodesy Symposia, 2003,126:123-132.
- [3] 李洁园,张国锋. 我国 IGS 站的周期变化特征[J]. 测绘信息与工程, 2008,33(5):10-12. (LI Jieyuan, ZHANG Guofeng. The periodic variation characteristic of IGS stations in china[J]. Journal of Geomatics Oct., 2008,33(5):10-12.)
- [4] 韩英,符养. GPS 高程数据时间序列分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2003,28(4):425-428. (HAN Ying, FU Yang. Analysis of GPS Time Series of Height Component[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003,28(4):425-428.)
- [5] 李健,吕志平,乔书波. 连续运行参考站网的演化与发展趋势[J]. 测绘科学, 2008,33(s1):44-46. (LI Jian, LV Zhiping, QIAO Shubo. Concept, evolution and tendency of CORS[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008,33(s1):44-46.)
- [6] 朱文耀,符养,李彦. GPS 高程导出的全球高程振荡运动及季节变化[J]. 中国科学:D 辑, 2003,33(5):470-481. (ZHU Wen yao, FU Yang, LI Yan. Global elevation oscillating movement and seasonal variation derived from GPS elevation[J]. Science in china: Series D, 2003,33(5):470-481.)
- [7] 杨强. 基于 IGS 连续跟踪站的地壳垂直形变时间序列分析[D]. 济南:山东科技大学, 2007:23-47. (YANG Qiang. Time series analysis for crustal vertical deformation based on IGS fiducial stations[D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2007:23-47.)
- [8] 徐文兵. GPS 连续运行参考站系统(CORS)定位精度的可靠性研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2009:10-55. (XU Wenbin. Research on Positioning Reliability for GPS Continuously Operating Reference Stations System[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009:10-55.)
- [9] 黄俊华,陈文森. 连续运行卫星定位综合服务系统建设与应用[M]. 北京:科学出版社, 2009:120-143. (HUANG Junhua, CHEN Wensen. The construction and Application of the continuous operation of the satellite positioning Comprehensive service system[M]. Beijing: Science Press, 2009:120-143.)
- [10] 楼顺天,于卫,闫华梁. MATLAB 程序设计语言[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1997:132-141. (LOU Shuntian, YU Wei, YAN Hualiang. Programming language of MATLAB[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Press, 1997:132-141.)
- [11] 杨强,党亚民,秘金钟. 基于 IGS 连续跟踪站的 GPS 高程时间序列分析[J]. 测绘科学, 2007,32(3):798-801. (YANG Qiang, DANG Yamin, BI Jinzhong. Analysis of GPS time series of height component based on IGS continuous observation stations[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007,32(3):798-801.)
- [12] 陈俊平,王解先. 中国境内 IGS 站数据处理及地壳运动研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2005,33(10):1414-1417. (CHEN Junping, WANG Jiexian. Data Processing of IGS Stations in China and Study of Crust Movement[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005,33(10):1414-1417.)
- [13] 孙立国,李世丹,李欣,等. 基于粒子滤波地形导航算法的精确近地告警方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011, 9(4):399-402. (SUN Liguang, LI Shidan, LI Xin, et al. Accurate ground proximity warning method based on particle filter terrain navigation algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(4):399-402.)

作者简介:



周 亚(1986-), 男, 安徽省濉溪县人, 学士, 中尉, 主要研究方向为定位技术. email: Moranzy5235@126.com.

王立峰(1975-), 男, 长春市人, 硕士, 主要研究方向为定位技术.

张思慧(1988-), 女, 沈阳市人, 硕士, 主要研究分析为大地测量技术.

赵 刚(1954-), 男, 辽宁省阜新市人, 教授, 博士生导师, 主要从事大地测量理论及技术研究.

张恒璟(1975-), 男, 辽宁省朝阳市人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事大地测量理论及技术研究.