第30卷第4期
2010年8月

大地测量与地球动力学
JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS

Vol. 30 No. 4
Aug. ,2010

文章编号:1671-5942(2010)04-0137-05

多核函数法在 GPS 时序资料处理中的应用*

杨　博　张风霜　韩月萍
(中国地震局第一监测中心, 天津　300180)

摘　要　研究发现多核函数法具有如下特点:1)在 GPS 时序资料滤波中很容易完成不同频段信息的提取与分离;2)缺失数据不太严重的情况下插值简单、精确;3)具有可解析性,参数及滤波值等精度评定严密;4)计算结果稳定,矩阵不易产生病态;5)计算简便、省时。结合 GPS 时序资料的处理,推荐出较为适用的多核函数,并指出了使用中应注意的问题。

关键词　GPS;时间序列;多核函数法;滤波;精度评定
中图分类号:P207　　**文献标识码**:A

METHOD OF MULTI-KERNEL FUNCTION AND ITS APPLICATION IN GPS TIME SERIES DATA PROCESSING

Yang Bo, Zhang Fengshuang and Han Yueping
(*First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin*　300180)

Abstract　Through testing and studying on the technique of multi-kernel function, which is a new numerical-approximation technique proposed in recent years, it is found that this method has the characteristics as follows: 1) It is easy to accomplish the extraction and separation of data of various frequency band during the filtering of GPS time series. 2) It is simple and accurate to complete the interpolation when the continuous lack of data is not very badly. 3) This method owns analyticity, and the accurate evaluation of parameters and filtering values is rigorous; 4) The computing result is stable, and it is not easy to produce ill-conditioned matrix. 5) The computing is simple and costs short time. Through some examples of data processing of GPS time series, the suitable multi-kernel function is recommended, and the problems needing attention are pointed out during concrete applications.

Key words: GPS; time series; method of multi-kernel funtion; filtering; precision evaluation

1　引言

最新的研究结果表明,GPS 时间序列观测值中包含白噪声和闪烁噪声,有些测站噪声中还包含着随机漫步噪声及各种周期成分[1-5],而且非常丰富,几乎涉及到了从甚高频到零频的各种信息。另一个基本事实是观测资料不够连续,所以数据的处理与分析不仅必要而且重要。目前,尽管滤波方法很多,但能完全满足需求的方法并不多。样条函数法、最小二乘配置法从理论上讲可以满足要求。但在实际应用中,当时序数据较长时样条函数法解算有时不太稳定,甚至崩溃;虽然最小二乘配置法是比较优秀

* **收稿日期**:2009-12-27
基金项目:"十一五"国家科技支撑课题(2006BAC01B03-01-01);中国地震局"强化华北地区强震监视跟踪项目"
作者简介:杨博,男,1985 年生,本科,主要从事 GNSS 数据处理研究. E-mail:boyyang1234@qq.com

的方法,但先验协方差阵的确定比较困难[6],另外计算耗时较长。因此,本文试图寻找一种功能较完备且简单易行的方法。多核函数法不失为一种较优秀的方法。

2 多核函数法

2.1 多核函数的基本思想

多核函数法的基本思想是任何数学表面和任何不规则的圆滑表面,总可以通过一系列有规则的数学表面的合成,以任意精度逼近。其数学表达式为:

$$f(x,y)=\sum_{j=1}^{m}c_jq_j(x,y,x_j,y_j) \tag{1}$$

式中,$q_j(x,y,x_j,y_j)$ 为核函数,(x_j,y_j) 为核点的坐标,c_j 为系数。一般说核函数是一个非常简单的曲面形态函数,通常为"钵"形或"钟"形曲面函数。

根据 Hardy 的思想,将其引入到一维自变量的情形。其数学表达式为:

$$f(t)=\sum_{j=1}^{m}c_jq_j(t,t_j) \tag{2}$$

2.2 核函数的选用

多核函数的逼近效果与效用不仅取决于核函数的多少,还取决于核函数的选取与核函数点及其间隔的选取。就核函数的选择来说,一般认为选择具有比较简单形态的核函数即可。至于哪一种更合适,看法也不尽相同[7]。经过对 GPS 时序资料的处理,认为选用"钟"形函数较为理想。所选择的两种核函数分别是倒数型(式(3))和高斯型核函数(式(4)):

$$q_j(t,t_j)=1/(k^a(t-t_j)^a+b) \tag{3}$$

$$q_j(t,t_j)=e^{-k^a(t-t_j)^a} \tag{4}$$

式中:a 为幂次(a 取何值为佳需结合应用的具体情况而定),b 为滤波因子,k 为量刚因子;k 的取值,若时序资料的时间以年为单位取 1 为宜;b 最佳取值范围为相邻观测值的时间间隔,即 1 天(0.0027 年);事实上,大一点或小一点均无明显的变化。影响滤波的是核函数点 t_j 的选取,影响滤波效果的是幂次 a。现利用实际观测资料讨论它们的选取。图 1 是 JIXN 站去掉线性成分后的东向时序观测结果(为天津网的计算结果)。

假定时序观测序列为 $F(t)$,其最优模型为:

$$f(t)=\sum_{j=1}^{m}c_jq_j(t,t_j)=\boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C} \tag{5}$$

式中,$\boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}=(q_1,\cdots,q_m)$ 为系数,$\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}=(c_1,\cdots,c_m)$ 为待定参数。根据最小二乘法可求解待定参数。因此可列出误差方程为:

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{QC}-\boldsymbol{L} \tag{6}$$

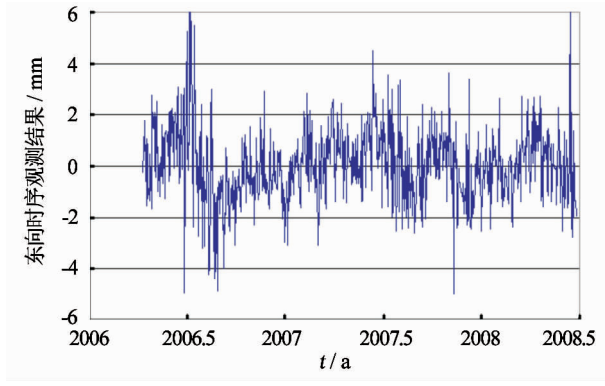


图 1 JIXN 站去掉线性成分后的东向时序观测结果

Fig. 1 Eastward time series results without linear component at JIXN

法方程为:

$$\boldsymbol{NC}+\boldsymbol{W}=0 \tag{7}$$

$\boldsymbol{C}$ 的求解表达式为:

$$\boldsymbol{C}=-\boldsymbol{N}^{-1}\boldsymbol{W} \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{Q}$ 为根据核函数 $\boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}=(q_1,\cdots,q_m)$ 所组成的误差方程系数矩阵,$\boldsymbol{L}$ 为由时间序列观测数据 $F(t)$ 所组成的观测值矩阵,$\boldsymbol{N}=\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}$,$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}$。此时,根据所得残差 $\boldsymbol{V}$ 即可求出观测值中误差:

$$M=\pm\sqrt{\frac{\sum\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}}{N-m}} \tag{9}$$

式中 N 为观测值的个数。

为了有效观察,核函数点的选择从观测时间开始按等间隔确定,等间隔值分别取 10,20,…,100 天;幂次 a 的初始值设定为 0.05,增量为 0.01,逐渐累加,并逐一计算其相应的中误差,并由此可获得表示它们之间关系的倒数型(图 2)和高斯型多核函数的相关图像(图 3),并以中误差的大小作为选择与衡量其优劣的标准。

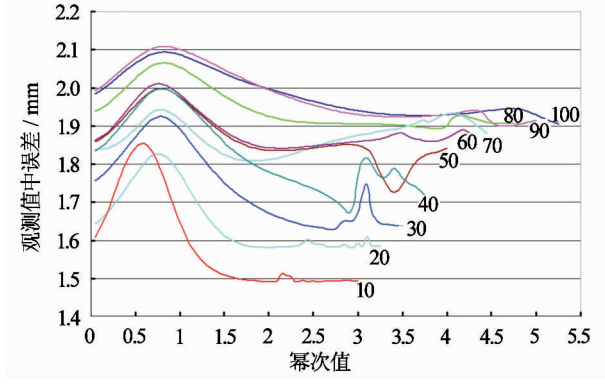


图 2 倒数型多核函数的核函数点间隔、幂次与中误差变化曲线

Fig. 2 The changes of kernel point interval, power and mean square error of the reciprocal type of multi-kernel funtion

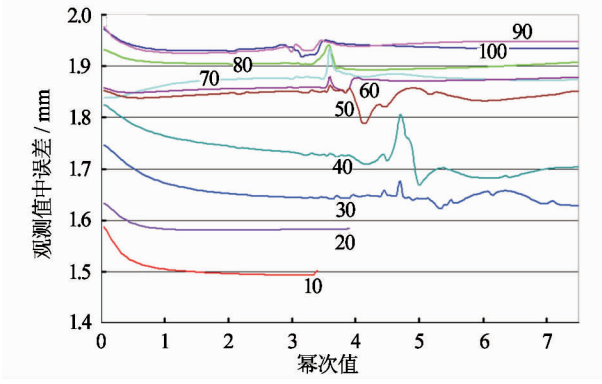


图 3　高斯型多核函数的核函数点间隔、幂次与中误差变化曲线

Fig. 3　The changes of kernel point interval, power and mean square error of the Gauss type of multi-kernel funtion

由图 2、3 可知:滤波结果与核函数点的间隔、幂次值大小关系密切。实际上核函数点间隔的长短主要体现了不同层次(频段)的信息,当核函数点的间隔越长,所显现的信息越趋于低频,故而中误差就越大,反之亦然;然而,幂次值大小则决定同一层次信息的滤波效果或质量。尤其对于倒数型多核函数来说,幂次取值的大小显得非常重要,图 2 中的结果清晰说明:幂次值较小时误差较大,当幂次值较大时又存在计算结果不稳定或失败的可能。虽然,随着核函数点间隔的延长,计算结果的稳定性相对加强,但不能仅以此来确定幂次值大小的选择,因为它已属于不同层面的滤波。所以,综合来看,倒数型核函数的幂次值取 2.8 是一个较优的选择。图 3 的结果说明:高斯型核函数的计算结果较前者稳定,中误差随着幂次值在 0 ~ 3 区间内增大而变小并趋于相对平稳,但当幂次值大于 3 时也有一定的跳动。综合来看,高斯型核函数的幂次值取 2.8 也是一个较优的选择。它们具体形式为:

$$q_j(t,t_j) = 1/(k^{2.8}(t-t_j)^{2.8} + 0.002\ 7) \quad (10)$$

$$q_j(t,t_j) = e^{-k^{2.8}(t-t_j)^{2.8}} \quad (11)$$

2.3　精度评定公式

单位权中误差估值为:

$$M_0 = \pm\sqrt{\frac{\sum \boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{V}}{N-m}} \quad (12)$$

参数 C 的方差为:

$$D_c = M_0^2 N^{-1} \quad (13)$$

滤波值 $f(t)$(包括插值点)的方差为:

$$D_{f(t)} = \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}} D_c \boldsymbol{q} \quad (14)$$

两时间点间差异变化 $f(\Delta t) = f(t_j) - f(t_i)$ 的方差为:

$$D_{f(\Delta t)} = \boldsymbol{\Delta q}^{\mathrm{T}} D_c \boldsymbol{\Delta q} \quad (15)$$

式中 $\boldsymbol{\Delta q} = q_{t_j} - q_{t_i}$。

2.4　多核函数应用中应注意的问题

由上可知多核函数的求解逼近较为简单,但功用却比较完备。不但可以进行各种频段的滤波,由于其解析性还可进行有效的插值和严密的精度评定等。但在使用中仍然要注意一些问题:1)对于单调的趋势变化为主的时间序列(线性变化),在资料的时间较长、观测累计值较大的情况下,当核函数点选择较稀疏(分离低频信息)时,计算误差会有所增加,这时最有效的处理是暂时性剔出线性项,使所有观测值之和等于或趋于零;

2)进行滤波时核函数点的间隔一定要等长,否则滤波的频段性会受到影响,误差也会有所增大;

3)上述结果的选定是以年为单位,若观测值是以天为单位时值取 1/365.24。尽管我们是根据一个台站的时序资料所给出的选定结果,经过诸多的计算结果均很一致,在众多台站的实用中效果都很好。

3　实例比较

以蓟县站为例观察两种核函数的滤波效果。核函数点时间间隔为 10 天、50 天、100 天时,JIXN 站东向观测数据(剔出线性向后)的滤波曲线结果如图 4 所示。

图 4 的结果清楚地说明,不论采用哪一种核函数,其滤波曲线均受控于核函数点的间隔的大小。当核函数点间隔越大,其滤波曲线越光滑,变化信息越趋于低频,反之亦然。详细观察图 4 还可知,当核点间隔为 10 天(图 4(a)、(b))、50 天时(图 4(c)、(d)),两种核函数的拟合曲线近乎完全一致((a)、(c)与(b)、(d)),时间间隔为 100 天时(图 4(e)、(f)),存在一些微小的差别,高斯型的则显得更加光滑。这说明两种方法的滤波结果相当。根据式(9),我们又分别计算了两种方法在不同核点时间间隔下的中误差(表 1 和图 5)。

表 1　JIXN 站各种时间间隔两种方法的中误差

Tab. 1　The mean square errors of two methods under various time intervals at JIXN

核点间隔(天)	高斯型(mm)	倒数型(mm)	核点间隔(天)	高斯型(mm)	倒数型(mm)
10	1.49	1.49	70	1.88	1.86
20	1.58	1.58	80	1.90	1.91
30	1.65	1.64	90	1.94	1.94
40	1.73	1.69	100	1.94	1.95
50	1.85	1.85	150	1.97	2.00
60	1.86	1.85	200	2.06	2.07

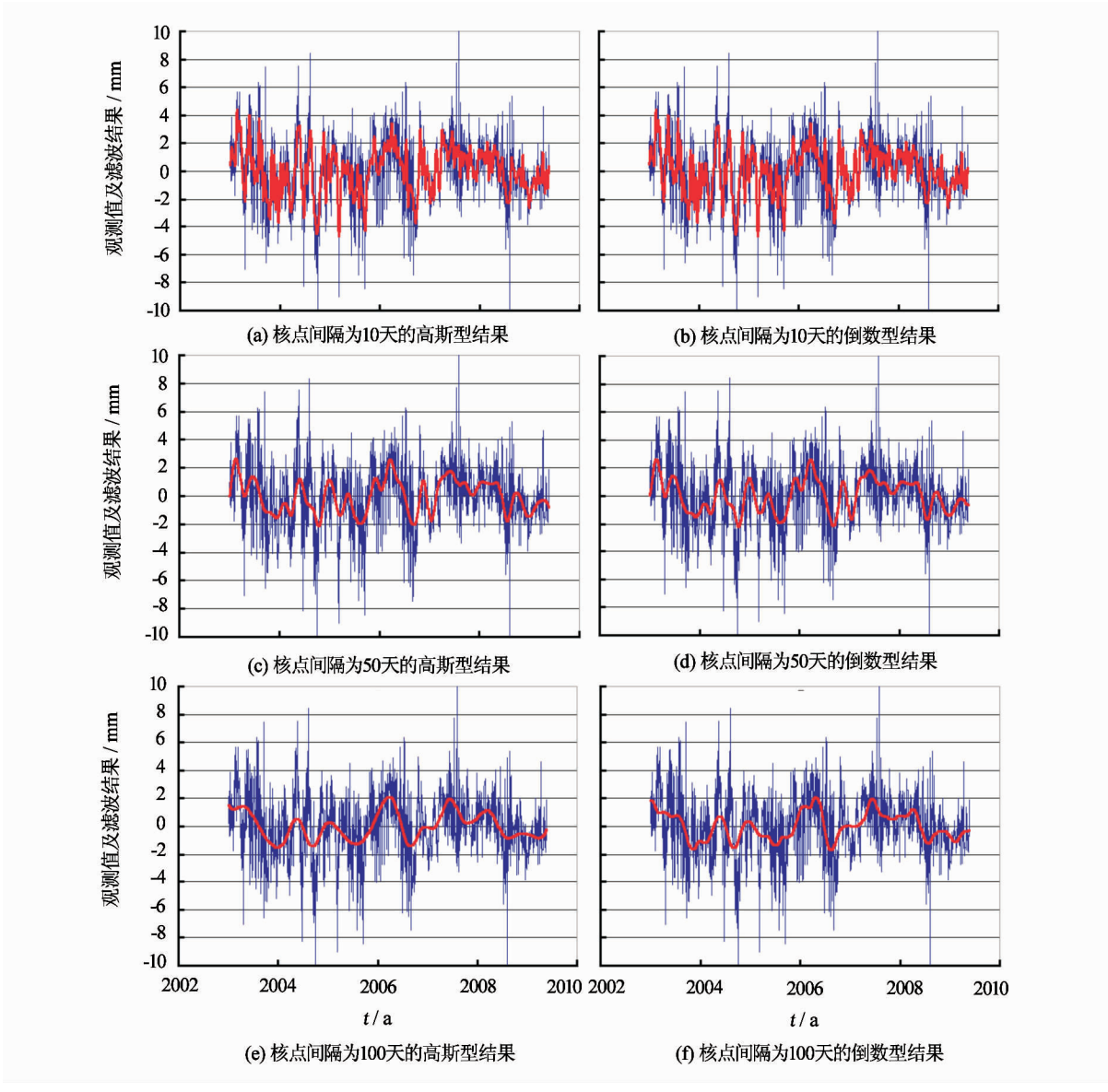


图 4 JIXN 站东向观测结果(蓝色曲线)和 3 种情况下的滤波结果(红色曲线)

ig. 4 Eastward observation results at JIXN (blue curves) and the filtered results (red curves) under three kinds of conditions

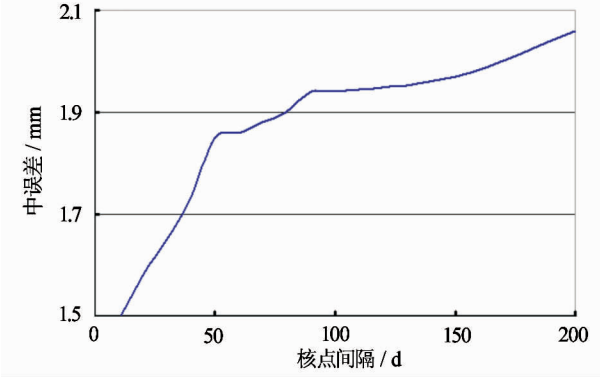


图 5 核点间隔与中误差的关系曲线

Fig. 5 The relation curve between kernel point interval and mean square error

从表 1 不难得出结论:在相同的核点时间间隔下,由两种核函数所得到的中误差结果非常接近。图 5 显示出核点间隔在 10 ~ 50 天内中误差变化最快(上升速度),其次是 50 ~ 90 天,超过 90 天则明显减慢,它可能表明误差在不同频谱范围(白噪声、闪烁噪声和随机漫步噪声)所占的比重,90 天以上时则不排除某种动态变化信息被中误差吸收。图 6 是北京房山台(BJFS)核点间隔为 10 天所得到东向滤波结果和相应的误差结果。滤波值的平均误差约 0.7 mm。两端点的误差较大,为模型端点效应所致。

4 结语

多核函数法对时序列资料的滤波、信息分离与提取等处理来说不失为一种较优秀的方法,同时它还兼有计算简单、功能完备、方法较严谨的优点。由于可获得解析形式,还可进一步在此基础上进行数

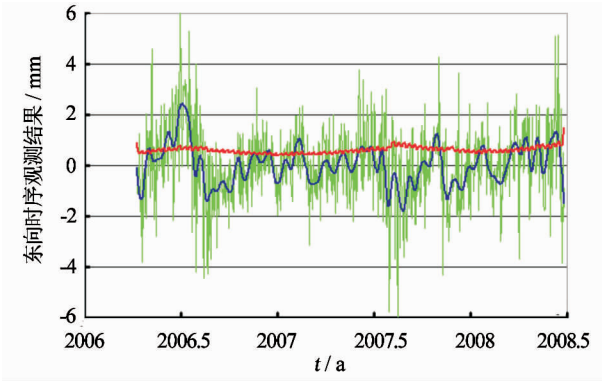


图 6　BJFS 台东向观测结果(绿色曲线)、核点间隔为 10 天滤波结果(蓝色曲线)及其误差(红色曲线)

Fig. 6　Eastward observation results at BJFS (green curve), the filtered results with kernel point intervalby ten days (blue curve) and their errors (red curve)

据处理,如计算速度、加速度等。除此之外,在一定条件下进行数据内插时,准确易行。至于哪一种核函数更好,现很难给出其明确的结论,根据我们的使用经验,采用高斯型核函数似乎更稳健一些。

致谢　感谢杨国华、王敏研究员为本项研究所给予的细心指导与帮助!

参　考　文　献

1　顾国华,张晶. 中国地壳运动观测网络基准站 GPS 观测的时间序列结果[J]. 大地测量与地球动力学,2002,22(2):61 – 67. (Gu Guohua and Zhang Jing. Time series of displacements from GPS observation at fiducial station in the crustal movement observation network of China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002,(2):61 – 67)

2　黄立人. GPS 基准站时间序列的噪声特性分析[J]. 大地测量与地球动力学,2006,(2):31 – 33. (Huang Liren. Noise properties in time series of coordinate component at GPS fiducial stations[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006,(2):31 – 33)

3　黄立人,符养. GPS 连续观测站的噪声分析[J]. 地震学报,2007,29(2):197 – 202. (Huang Liren and Fu Yang. Analysis on the noises from continuously monitoring GPS sites [J]. Acta Seismologica Sinica,2007,29(2):197 – 202)

4　王敏,沈正康,董大南. 非构造形变对 GPS 连续站位置时间序列的影响与修正[J]. 地球物理学报,2005,48(5):1 045 – 1 052. (Wang Min,Shen Zhengkang and Dong Danan. Effects of non – tectonic crustal deformation on continuous GPS position time series and correction to them[J]. Chinese Journal of Geophysics,2005,48(5):1 045 – 1 052)

5　杨国华,等. GPS 基准站坐标分量噪声的时间序列与分类特征[J]. 国际地震动态,2007,(7),80 – 86. (Yang Guohua,et al. Time sequences of noise of the coordinate component of GPS reference stations and its classified characteristics[J]. Recent Development in World Seismology, 2007,(7):80 – 86)

6　陶本藻,姚宜斌. 基于多面核函数配置型模型的参数估计[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2003,28(5):547 – 550. (Tao Benzao and Yao Yibin. Parameter estimation based on multi-quadric collocation model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(5):547 – 550)

7　杨国华,黄立人. 速度面拟合法中多面函数几个特性的初步数值研究[J]. 地壳形变与地震,1990,(4):70 – 82. (Yang Guohua and Huang Liren. Primary numerical study of several characteristics about multi-surface function in fitting method of velocity surface [J]. Crustal Deformation and Earthquake,1990,(4):70 – 82)

(上接第 136 页)

参　考　文　献

1　Foster I and Kesselman C. Grid computing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004.

2　张传定,等. GPS 多差相位观测量数学相关性的解析表示[J]. 测绘学报,2004,33(3):221 – 227. (Zhang Zhuanding, et al. An analytical stochastic model of multi – differences GPS carrier phase data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(3):221 – 227)

3　周建郑. GPS 定位原理与技术[M]. 郑州:黄河水利出版社,2005. (Zhou Jianzheng. Principle and technology of GPS positioning[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Resources Press,2005)

4　许其凤. 空间大地测量学[M]. 北京:解放军出版社,2001. (Xu Qifeng. Space geodesy[M]. Beijing: The PLA Press,2001)

5　Morgan M and Wasson G. WSRF. NET developer tutorial [EB/OL]. http://www. cs. virginia. edu/ ~ gsw2c/WSRFdotNet/WSRF. NET_Developer_Tutorial. pdf, 2006.

6　Czajkowski K, et al. The WS – resource framework [EB/OL]. http://www – 106. ibm. com/developerworks/ library/ws – resource/ws – wsrf. pdf, 2004.

7　宋力杰,欧阳桂崇. 超大规模大地网分区平差快速解算方法[J]. 测绘学报,2003,32(3):204 – 207. (Song Lijie and Ouyang Guichong. A fast method of soving partitioned adjustment for super large-scale geodetic network[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(3):204 – 207)