

顾铁,李萌,严丽.高频 GPS 坐标时序的噪声特性分析[J].地震工程学报,2017,39(5):963-968.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.963

GU Tie,LI Meng,YAN Li.Noise Characteristics Analysis of the High-rate GPS Coordinate Time Series[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(5):963-968.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.963

高频 GPS 坐标时序的噪声特性分析^①

顾 铁¹,李 萌^{2,3},严 丽³

(1.四川省地震局 减灾救助研究所,四川 成都 610041;2.成都理工大学 地球科学学院,四川 成都 610059;
3.西南交通大学 地球科学与环境工程学院,四川 成都 610031)

摘要:为研究高频 GPS 坐标时序的噪声特性,对芦山地震前后三天,北京时间 8:00—9:00,位于四川盆地 8 个 CORS 站 50 Hz 的高频观测资料进行解算与分析。分析过程中,分别采用恒星日滤波和主成分滤波分析以及去除时空噪声,并采用功率谱分析经滤波后的坐标时序。结果表明,高频 GPS 坐标时序的谱指数在 1.6~2.0 间,符合白噪声+随机游走噪声模型特性。建议当利用高频 GPS 研究地表运动特性、监测大型建筑的运动结构或确定 GPS 动态实验平台姿态时,应考虑高频 GPS 坐标时序的这一噪声特性。

关键词:CORS; 多路径; 共模误差; 恒星日滤波; 频谱分析; 噪声特性

中图分类号:P228.4

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2017)05-0963-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.0963

Noise Characteristics Analysis of the High-rate GPS Coordinate Time Series

GU Tie¹, LI Meng^{2,3}, YAN Li³

(1. Disaster Relief Research Institute, Sichuan Provincial Earthquake Bureau, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

3. Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: To investigate the noise characteristics of the high-rate GPS coordinate time series, one-hour high-rate observations of eight CORS sites in the Sichuan basin from 8:00—9:00 Beijing time for three days, including the Lushan earthquake, are resolved and analyzed. The sidereal filtering and principle component analysis filtering are utilized to analyze and reduce the temporal and spatial noise separately; the power spectrum method is used to estimate the spectrum index. With the spectrum index from 1.6 to 2, we consider the high-rate coordinate time series are adjusted for white noise plus random walk noise characteristics. These results have important implications for the design of continuous GPS networks for crustal deformation and structural monitoring, and also for positioning and attitude determination of dynamic platforms.

Key words: CORS; multipath; common mode errors; sidereal filtering; power spectrum; noise characteristic

① 收稿日期:2016-05-25

基金项目:四川省地震局地震科技专项(LY1612)

作者简介:顾 铁(1980—),女,工程师,主要从事 GPS 数据处理与地震地壳形变研究。E-mail:gutie77@qq.com。

0 引言

随着 GPS 采样率、计算性能和存储性能的不断提高,利用短时、高频 GPS 观测手段研究同震地表位移形变、监测高大建筑的动态位移等已在 GPS 地震学、结构抗震等领域中广泛运用^[1-2]。但利用高精度软件(如 GAMIT/GLOBK 中的 TRACK 软件)获取的高频 GPS 坐标时序仍包含各类误差的影响。从时空角度出发,主要可区分为多路径效应和共模误差^[3-4],其中有学者指出^[5]频率影响范围在 0.054~0.065 Hz 间的多路径效应很难识别。若利用恒星日滤波^[6-7]、主成分滤波(Principle Component Analysis, PCA)^[8]合理减弱了这两大类噪声,之后的高频 GPS 坐标时序仍有可能包含 GPS 技术固有的一些噪声特性。若简单的将滤波后的结果作为白噪声处理,会忽略这类系统误差或一些细微信息(如构造形变等)所带来的影响,从而得到与实际并不相符的解释。因此深入分析研究高频 GPS 坐标时序的噪声特性是极为必要。

当采样率、分析区域及解算策略不同时,高频时序噪声特性便会有差异性。Langbein 等^[9]在分析美国帕克菲尔德 30 s~1 Hz 的 GPS 观测资料时,认为 GPS 水平方向坐标时序的噪声特性主要表现为闪烁噪声+白噪声。Genrich 等^[10]通过加州 1~50 Hz 的基线观测数据(几米至几十公里)的时序频谱分析,指出低于 0.5 Hz 的为随机游走噪声,高于 0.5 Hz 的为白噪声。Zakharov^[11]利用全球 19 个较均匀分布的 GPS 观测点,联合区域地震的动态特征,采用动态系统及分形集理论分析方法,认为以天为单位,GPS 观测到的地表动态位移所包含的噪声谱指数接近 1,为闪烁噪声。Moschas 等^[12]利用谱分析方法对小范围(<10 km)、10 Hz 高频 GPS 短时(10~104 s)观测量的数据分析认为,低于 0.2 Hz 的坐标时序有色噪声显著,高于 2.5 Hz 的可认为仅由白噪声构成。

本文旨在分析四川区域中长距离、高频 GPS 坐标时序的噪声特性。数据处理策略为双差定位原理,区域中采用同一参考站,不可避免地引入了因同一参考站、同一区域而引起的误差共模误差。在对高频坐标时序的分析过程中,采用主成分滤波去除共模误差的影响,采用恒星日滤波分析多路径效应。最后利用功率谱拟合估计得出测站的噪声谱指数,从而评估其高频时序的噪声特性。

1 时空噪声的分析与滤除

分析采用的数据为四川盆地上的 9 个 CORS 站 50 Hz 的观测资料(测站分布如图 1),时间段为包含芦山地震的 8:00~9:00 的 3 天数据即(4 月 18 日—20 日,年积日为 2013 年,108—110)。采用 GAMIT 软件中的 TRACK 模块解算数据。在中长基线的解算中,TRACK 模块通过 LC 组合、MWL 组合以及电离层约束值解算浮点解,并利用卡尔曼滤波优化^[13]。动态位移坐标序列解算的精度一般可达到 1~2 cm。

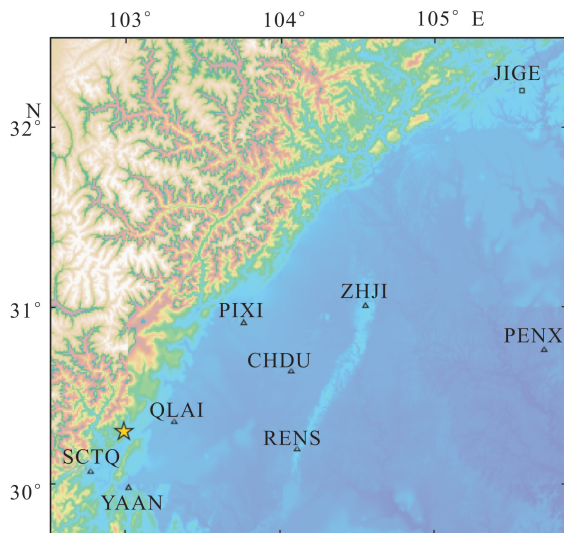


图 1 CORS 站分布图(黄色五角星为中国地震局公布的芦山地震位置,JIGE 为参考站)

Fig.1 Distribution map of CORS stations (The yellow pentagram indicates the location of Lushan earthquake published by China Earthquake Administration, JIGE is the reference station)

与精密单点定位方法不同,动态差分定位(如 TRACK 软件)解算时需选定一个观测质量好,且在惯性坐标系下处于静止状态的观测站作为参考。差分定位可以去除卫星钟差、接收机钟差、减弱大气延迟等影响。但在实际应用中,参考站的观测质量难免会受环境噪声干扰,从而影响解算结果。因此在区域范围较小,利用相同参考站解算而获取的高频 GPS 坐标时序,在空间域中产生的共同影响可视为共模误差,可利用主成分滤波将其影响合理去除^[8]。

对单个测站而言,除了空间域噪声(共模误差)的影响,在时间域中也被证实是存在噪声影响的,这被广泛认为是多路径效应^[5]。但在短时高频 GPS 坐标时序中,此类影响表征并不明显,因此分离并合理提取多路径信号并不容易。本文采用恒星日滤波

去除多路径,并采用时相关、频谱分析方法对比滤除前后时序特征。

1.1 共模误差影响与 PCA 滤波

高频观测数据量大,对于 50 Hz 的高频观测数据,1 个观测时段(15 min)便包含了 45 000 个观测历元,足以描述测站间的共模性。通过对该数据的

主成分分析,发现无论是地震前,还是地震当天,前两个主成分分量之和在 N、E、U 三个分量上均占到 80%以上,统计情况如表 1 所列。

当前几个主成分贡献率之和大于 85%时,即可将其视为共模误差予以滤除^[14]。图 2 为地震当天 QLAI、RENS 站在 N 方向经主成分滤波,滤除前、

表 1 地震前两天及地震当天 NEU 主成分分量统计

主成分分量	年积日								
	108			109			110		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U
PC1/%	71.12	58.68	85.14	80.69	63.08	87.68	64.30	84.02	85.19
PC2/%	12.02	22.61	9.80	12.07	20.62	5.56	17.32	8.60	11.28
PC3/%	6.54	7.84	2.32	3.71	5.54	3.51	6.98	1.97	2.12

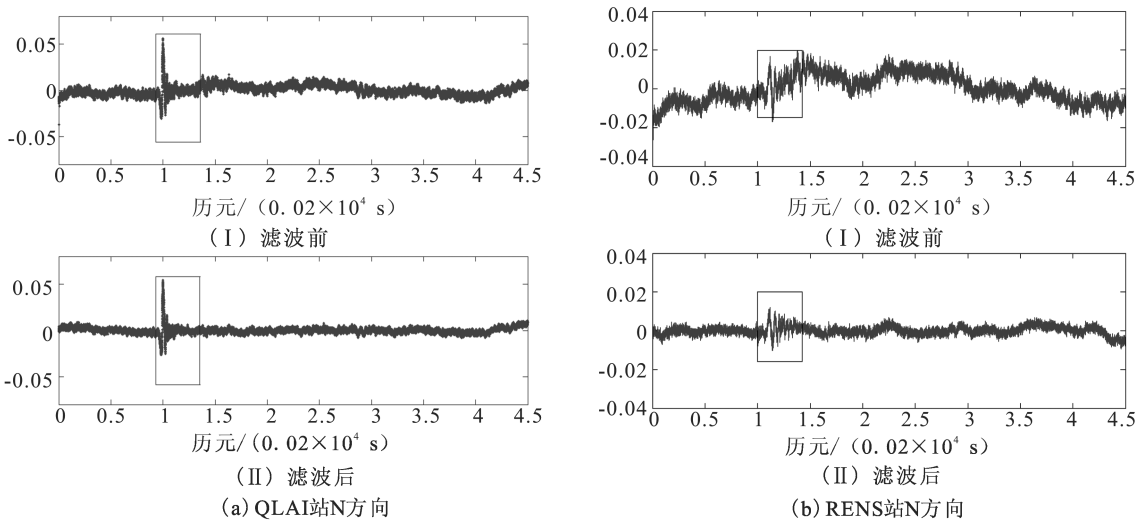


图 2 QLAI、RENS 站 N 方向坐标时序滤波前后对比

Fig.2 Comparison of the coordinate series in the N direction of QLAI and RENS station before and after filtering

后的效果(方框为地震影响测站坐标时序的时间段)。我们发现,经主成分滤波后坐标时序的均方根(root mean squares, RMS)得到了约 30%~60%的改善,但在地震发生时段却无明显影响。

1.2 多路径误差影响与恒星日滤波

经测试发现,多路径效应对高频短时坐标时序存在一定影响。以年积日 108 和 109、50 Hz 高频 15 min,PENX 与 QLAI 站的观测数据为例,两天的时延迟在 246 s 左右。恒星日滤波能显著降低坐标残差序列的相关性(图 3)。因此对短时高频时序的恒星日滤波可一定程度减弱多路径误差的影响。

然而采取恒星日滤波前后坐标时序,经功率谱变换后,通过功率谱(图 4)的对比,可发现滤波后高频部分功率谱密度明显偏大。具体表现在 PENX 站频率大于 0.015 Hz,QLAI 站频率大于 0.005 Hz 范围,滤波后的功率谱密度整体上小于滤波前。表

2 为恒星日滤波前后各站时序的 RMS 值统计,其相差范围均在 1 mm 内。对短时高频时序的恒星日滤波,可一定程度减弱多路径误差的影响,但对高频时序的 RMS 值改善并不明显,与 Avallone 等^[15]的研究结果非常相似。笔者分析这应为恒星日滤波引入前一天残留的误差及噪声。因此在后文的分析中并未采取恒星日滤波减弱多路径的影响。

表 2 各站 N 方向高频坐标残差序列 RMS 值

	RMS/mm							
	CHDU	PENX	PIXI	QLAI	RENS	SCTQ	YAAN	ZHJI
滤波前	3.6	4.4	7.9	4.3	2.7	7.0	4.0	4.0
滤波后	4.0	4.3	7.0	5.1	3.3	6.7	3.5	4.4

2 噪声特性分析

利用功率谱谱指数拟合分析方法^[9, 16],对各站

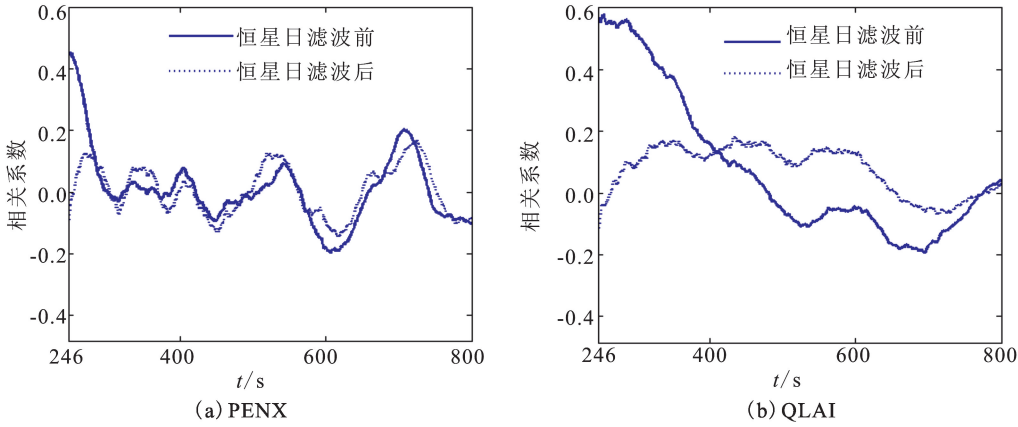


图 3 恒星日滤波前后坐标残差序列相关性

Fig.3 Correlation between coordinate residual series before and after sidereal filtering

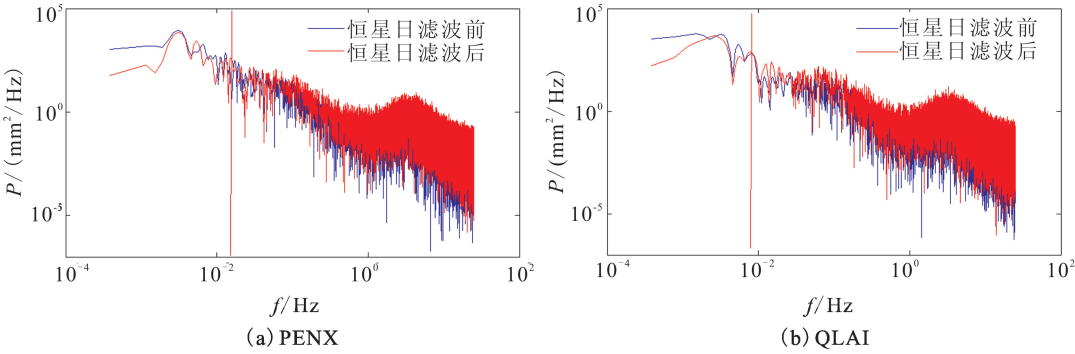


图 4 恒星日滤波前后坐标残差序列的功率谱图

Fig.4 Power spectra of coordinate residual series before and after sidereal filtering

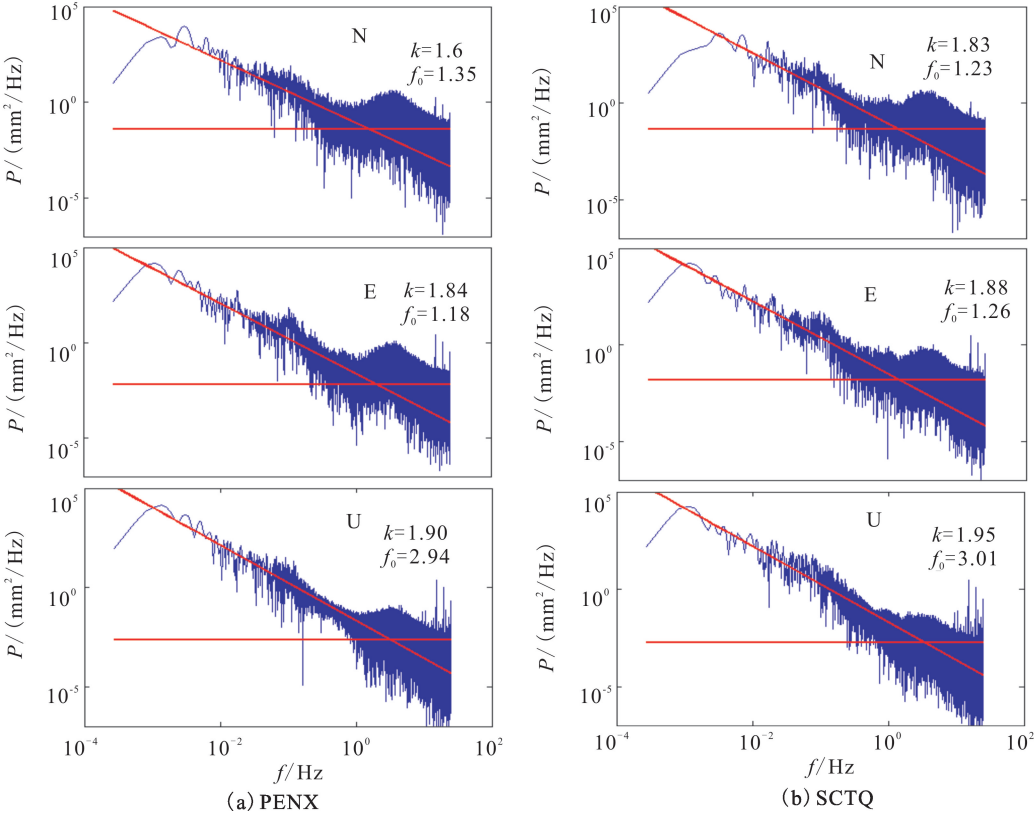


图 5 50 Hz 高频时序 NEU 方向功率谱

Fig.5 Power spectra of high frequency series of 50 Hz in the NEU direction

的高频 (50 Hz) 坐标时序的噪声特性进行分析表 3。图 5 为年积日 109, 北京时间 8: 00—8: 15, CORS 站 PENX 与 QLAI 站在三个方向 N、E、U 的拟合分析图。其中 k 为谱指数, 描述坐标时序的噪声特性; f_0 为交叉频率, 描述有色噪声占据的带宽范围。

表 3 谱指数统计表
Table 3 Statistics of spectral indexes

测站	谱指数			交叉频率/Hz		
	N	E	U	N	E	U
CHDU	1.54	1.72	1.93	1.40	1.23	2.98
PENX	1.60	1.84	1.90	1.35	1.18	2.94
PIXI	1.68	1.81	1.95	1.45	1.24	3.03
QLAI	1.59	1.82	1.96	1.30	1.41	3.26
RENS	1.79	1.71	1.92	1.36	1.35	3.13
SCTQ	1.83	1.88	1.95	1.23	1.26	3.01
YAAN	1.88	1.79	2.03	1.55	1.60	3.23
ZHJI	1.94	1.72	2.10	1.48	1.52	3.11

当谱指数的拟合值大于 1.5, 接近于 2 时, 更符合白噪声+随机游走噪声的特性^[12]。通过对各站的拟合分析与噪声特性参数的统计可知, 四川区域内多个测站的谱指数接近于 2, 其短时高频 GPS 时序噪声符合随机游走噪声+白噪声的噪声特性。水平方向上, 交叉频率在 1~1.4 H 之间, 垂直方向交叉频率接近于 3 Hz, 垂向的有色噪声占据频率范围更宽。

采样率是否会影响高频时序的噪声特性是下一步主要探讨的内容, 分析中以 QLAI 站为例, 采用 10 Hz 高频坐标时序, 并与 50 Hz 坐标时序进行对比(图 6)。

通过图 6 的对比分析发现, 除开因采样率引起的一些本质特性, 如 10 Hz 坐标时序的功率谱密度和交叉频率低于 50 Hz, 在谱指数的拟合值上两者基本保持一致。

3 结论

对于小范围区域, 若采用差分定位原理, 采取相同参考站求解得到的短时高频坐标序列, 共模误差的影响不容忽视, 主成分滤波能有效减小其影响, 改善坐标时序的均方根值; 恒星日滤波虽然能有效去除多路径效应影响, 但也会引入新的高频噪声, 因此可视具体分析对象适时引入。

以芦山地震前两天四川区域高频 (50 Hz 和 10 Hz) CORS 站的分析为例, 经时空滤波后的坐标噪声特性呈白噪声+随机游走噪声特性。在有色噪声所占据的频谱带宽中, 水平方向明显低于垂直方向。

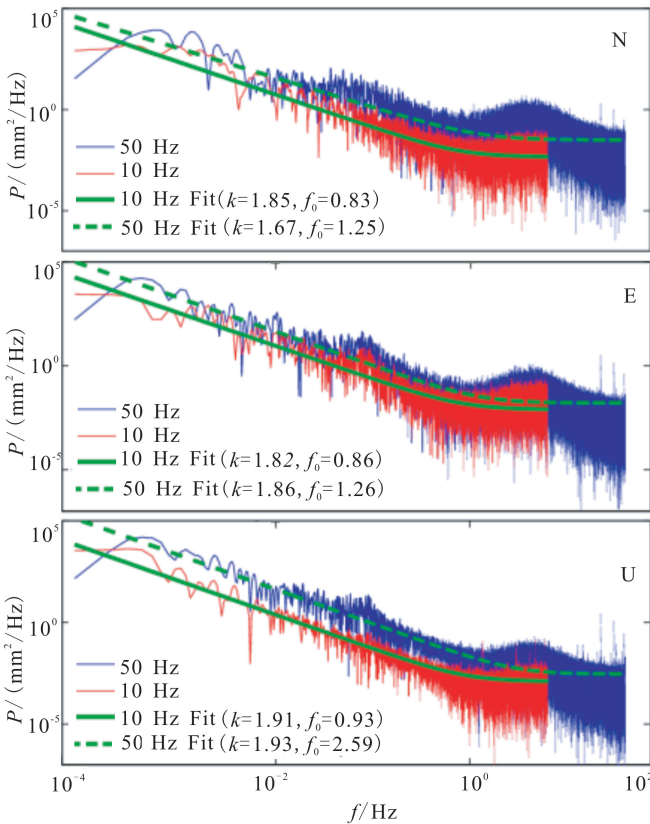


图 6 10 Hz 与 50 Hz 高频时序功率谱

Fig.6 Power spectrums of high frequency sequence of 10 Hz and 50 Hz

参考文献(References)

[1] 殷海涛, 张培震, 甘卫军, 等. 高频 GPS 测定的汶川 $M_s8.0$ 地震震时近场地表变形过程[J]. 科学通报, 2010(26): 2621-2626.
YIN Haitao, ZHANG Peizhen, GAN Weijun, et al. Near Field Surface Deformation Process of Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake Measured by High Frequency GPS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010(26): 2612-2626.

[2] MOSCHAS F, STIROUS S. Measurement of the Dynamic Displacements and of the Modal Frequencies of a Short-span Pedestrian Bridge Using GPS and an Accelerometer[J]. Engineering Structures, 2011, 33(1): 10-17.

[3] LARSON K M, BILICH A, Axelrad P. Improving the Precision of High-rate GPS[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978—2012), 2007, 112(B5).

[4] 殷海涛, 甘卫军, 熊永良, 等. PCA 空间滤波在高频 GPS 定位中的应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011(7): 825-829.
YIN Haitao, GAN Weijun, XIONAG Yong-liang, et al. Research on the Application of PCA Spatial Filtering in High Frequency GPS Positioning[J]. Journal of Wuhan University, 2001(7): 825-829.

[5] OGAJA C, SATIRAPOD C. Analysis of High-frequency Multipath in 1 Hz GPS Kinematic Solutions[J]. GPS Solutions,

- 2007, 11(4): 269-280.
- [6] RAGHEB A E, CLARKE P J, Edwards S J. GPS Sidereal Filtering: Coordinate and Carrier-phase-level Strategies[J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(5): 325-335.
- [7] CHOI K, BILICH A, LARSON K M, et al. Modified Sidereal Filtering: Implications for High-rate GPS Positioning[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(22): L22608.
- [8] DONG D, FANG P, BOCK Y, et al. Spatiotemporal Filtering Using Principal Component Analysis and Karhunen-loeve Expansion Approaches for Regional GPS Network Analysis[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2006, 111(B3): B3405.
- [9] LANGBEIN J, BOCK Y. High-rate Real-time GPS Network at Parkfield: Utility for Detecting Fault Slip and Seismic Displacements[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(15).
- [10] GENRICH J F, BOCK Y. Instantaneous Geodetic Positioning with 10 ~ 50 Hz GPS Measurements: Noise Characteristics and Implications for Monitoring Networks[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(B3): B3403.
- [11] ZAKHAROV V S. The Dynamic Characteristics of GPS Time Series and Their Relation to the Seismotectonic Specific Features of a Region[J]. Moscow University Geology Bulletin, 2013, 68(3): 165-174.
- [12] MOSCHAS F, STIROS S. Noise Characteristics of High-frequency, Short-duration GPS Records from Analysis of Identical, Collocated Instruments[J]. Measurement, 2013, 46(4): 1488-1506.
- [13] 殷海涛, 肖根如, 张磊, 等. TRACK 高频 GPS 定位中震时参考站的选取方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2012(4): 15-19.
- YIN Haitao, XIAO Genru, ZHANG Lei, et al. The Method of Selecting Reference Station in TRACK High Frequency GPS Positioning in the Middle of Earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012(4): 15-19.
- [14] 何平. 数理统计与多元统计[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- HE Ping. Mathematical Statistics and Multivariate statistics [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007.
- [15] AVALLONE A, MARZARIO M, CIRELLA A, et al. Very High Rate (10 Hz) GPS Seismology for Moderate-magnitude Earthquakes: The Case of the $M_w 6.3$ L'Aquila (Central Italy) Event[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2011, 116(B2): B2305.
- [16] WILLIAMS S D, BOCK Y, FANG P, et al. Error Analysis of Continuous GPS Position Time Series[J]. Journal of Geophysical Research [Solid Earth (1978—2012)], 2004, 109(B3).