

海潮负荷对利用 GPS 解算对流层天顶延迟的影响^{* 1}

赵 红¹⁾ 张 勤¹⁾ 瞿 伟¹⁾ 涂 锐²⁾ 刘 智³⁾

(1) 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054
(2) 德国波茨坦地学中心, 德国 14469
(3) 机械工业勘察设计研究院, 西安 710043

摘 要 分别选取分布在全球沿海及内陆区域的多个 IGS 跟踪站, 基于海潮负荷对测站位移影响的理论, 通过设计多种方案对监测数据进行解算, 结果显示: 1) 海潮负荷对测站高程的影响是 cm 量级; 2) 在考虑和不考虑海潮负荷效应时, 利用 GPS 观测数据解算的对流层天顶延迟值的差异是 mm 量级; 3) 这一差异与测站高程的海潮负荷效应存在弱线性关系。

关键词 海潮负荷; 对流层天顶延迟; 测站高程; 海潮模型

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

OCEAN TIDE LOADING EFFECT ON TROPOSPHERE ZENITH DELAY ESTIMATION SLOVED BY GPS

Zhao Hong, Zhang Qin, Qu Wei, Tu Rui and Liu Zhi

(1) School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054
(2) GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany 14469
(3) China JK Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an 710054

Abstract This paper chooses several IGS tracking stations which distributed in coastal and inland regions of globe, uses the basic theory of the effect of ocean loading on station displacement to design a variety of programs to process the monitoring data. The results show: 1) The effect of ocean tide loading on the station elevation was cm level; 2) The effect of ocean tide loading on troposphere zenith delay estimation was mm level 3) There exists weak linear relationship between the troposphere effect of ocean loading and the influence of elevation.

Key words: ocean tide loading; troposphere zenith delay; elevation; ocean tide model

影响 GPS 垂直定位精度的因素主要有对流层延迟和海潮负荷。将对流层延迟作为参数进行求解, 可在一定程度上提高 GPS 的垂直定位精度^[1]。海潮负荷效应是由于海水在日月引潮力作用下的周期性涨落所导致的固体地球的周期性形变(包括位移和引力的变化等)。周江存研究了海潮负荷对 GPS 基线的

影响, 认为海潮负荷对点位有几 mm 的影响, 在沿海地区的垂直位移达到 cm 级^[2]; 陈宪东对 GPS 精密定位中的海潮负荷改正进行研究, 认为海潮负荷对沿海地区影响较大, GPS 精密定位时不仅应考虑测站位移的海潮负荷改正, 还应注意选择精度较高的全球海潮模型^[3]; 王志强研究了考虑海潮负荷和不考虑海潮负

* 收稿日期: 2013-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202189, 41274005); 中国博士后基金项目(2013M530412)。

作者简介: 赵红, 女, 1988 年生, 博士生, 主要研究方向为海潮负荷对 GPS 定位的影响及 GPS 数据处理。Email: zhaohong710@163.com。

通讯作者: 张勤, 教授, 主要研究方向为误差理论及 GPS 数据处理。Email: zhangqinle@263.net.cn。

荷情况下对 GPS 解算天顶延迟的影响^[1];Svey 等指出,在考虑和不考虑海潮负荷效应时,利用 GPS 观测数据解算的对流层天顶延迟值的差异与测站高程的海潮负荷效应之间存在着似线性关系^[4]。

研究表明,在欧洲区域 14 m 的海潮瞬时潮高会引起 5 ~ 16 cm 的地壳垂直位移变化,水平位移约为垂直方向的 1/3^[5]。海潮负荷的影响具有明显的周期性,周日潮和半日潮在一天的平均影响接近于零,连续长时间的观测可以削弱海潮对测站位移的影响。但在估计对流层天顶延迟值时,由于估算天顶延迟参数的时间间隔通常较短,在 1 ~ 2 h 左右,海潮负荷的影响不能很好地抵消。特别是观测时段处在海潮的高潮时,这种影响很大,不能忽略。本文在全球沿海及内陆区域分别选取多个 IGS 跟踪站,通过对 GPS 数据进行精密解算与分析得出了一些有益的结论。

1 测站位移的海潮负荷效应公式

测站位移的海潮负荷效应公式如下:

$$L(\varphi, \lambda, t) = \begin{bmatrix} L_{\text{径向}}(\varphi, \lambda, t) \\ L_{\text{东西}}(\varphi, \lambda, t) \\ L_{\text{南北}}(\varphi, \lambda, t) \end{bmatrix} = \sum_{p=1}^N \begin{bmatrix} L_{P\text{径向}} \\ L_{P\text{东西}} \\ L_{P\text{南北}} \end{bmatrix} \cos(\omega_p t + \chi_p - \begin{bmatrix} \delta_{P\text{径向}} \\ \delta_{P\text{东西}} \\ \delta_{P\text{南北}} \end{bmatrix}) \quad (1)$$

式中, N 为分潮总数,海潮模型对测站位移改正一般考虑 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 M_f 、 M_m 、 S_{sa} 11 个主要潮波的影响; $L_{P\text{径向}}(\varphi, \lambda)$ 、 $L_{P\text{东西}}(\varphi, \lambda)$ 、 $L_{P\text{南北}}(\varphi, \lambda)$ 和 $\delta_{P\text{径向}}$ 、 $\delta_{P\text{东西}}$ 、 $\delta_{P\text{南北}}$ 分别是 P 波在测站处的径向、东西、南北方向的振幅和相位; ω_p 是 P 波的角速度; χ_p 是 P 波的天文幅角初相,各潮波的天文幅角初相与太阳和月亮的位置有关; t 是从计算天文幅角初相开始的时间; $L_{P\text{径向}}(\varphi, \lambda, t)$ 、 $L_{P\text{东西}}(\varphi, \lambda, t)$ 、 $L_{P\text{南北}}(\varphi, \lambda, t)$ 为海潮负荷引起的测站径向、东西和南北向的位移改正,本文为 U 、 E 、 N 三个方向^[6]。

为了提高 GPS 的定位精度,在 GPS 数据处理时一般将对流层天顶延迟作为参数进行求解。海潮负荷对测站位移的影响主要是周日和半日周期。在 GPS 数据处理过程中,若不进行海潮负荷位移改正,测站的定位效果将受到影响,此时短时间间隔估计的对流层天顶延迟值也会受到影响。

2 实例分析与讨论

2.1 海潮负荷对对流层天顶延迟测定的影响

选取全球范围内的 10 个 IGS 连续跟踪站(分布

于沿海的测站 CONZ、WES2、HRAO、KOKB、TSKB 及位于内陆的测站 NYAL、ONSA、SVTL、WTZR、ZECK), IGS 测站名与图 1 中 VLBI 监测站名一一对应(ZECK-ZELE、CONZ-TIGO、TSKB-TSUK、WES2-WEST、WTZR-WETT、ONSA-ONSA、HRAO-HART、KOKB-KOKE、NYAL-NYAL、SVTL-SVET), 2010 年年积日第 225 ~ 239 的数据,解算数据采用 Saastamoinen 模型进行对流层延迟估计(每 2 h 估计一次),分两个方案解算:方案一,采用 FES2004 海潮模型进行海潮负荷改正;方案二,不进行海潮负荷改正。

将方案一与方案二所得对流层天顶延迟值相减,就是有和无海潮负荷时对天顶延迟解算值的影响,如图 2 所示。



图 1 全球 VLBI 监测站分布图

Fig. 1 Distribution of global VLBI stations

图 2 是不同测站分别按方案一与方案二计算的对流层天顶延迟值的差异,即海潮负荷对对流层天顶延迟测定的影响。图 2 中不同区域测站的结果显示,海潮负荷对测站天顶延迟测定的影响为数 mm,与海潮负荷对测站位移的影响结论一致^[6],即沿海测站的影响大于内陆测站。

2.2 海潮负荷对对流层天顶延迟测定及 GPS 测站高程影响的关系

重新选取全球范围内的 10 个 IGS 连续跟踪站(分布于沿海的测站 SHAO、HARB、HOB2、KOKB、TSKB 及位于内陆的测站 NYA1、FAIR、ALGO、WTZA、MATE) 2010 年年积日第 285 ~ 365 d 的数据进行分析,测站位置分布如图 3 中五角星所示。

选取图 3 中 10 个 IGS 连续跟踪站两个月的数据,采用与 § 2.1 同样的两种方案。以 FAIR-KOKB 基线为例,列出方案二中基线垂直分量变化与基线两端对流层天顶延迟变化的比较,如图 4。

图 4 是采用方案二计算所得的结果。对流层延迟采用单天解且每 2 h 估计一次,基线变化采用 3 h 为一时段进行解算。由图 4 可以看出,FAIR 与 KOKB 测站对流层天顶延迟估计之差的变化与

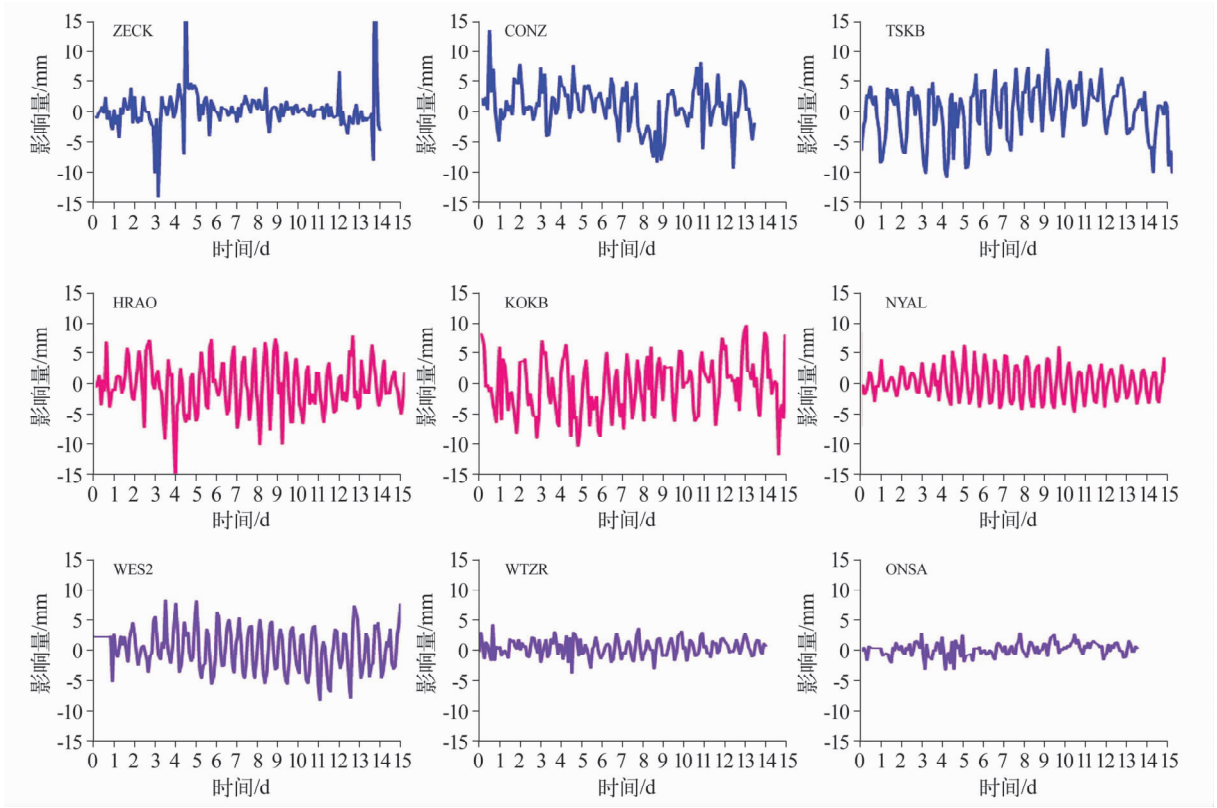


图2 海潮负荷对对流层天顶延迟测定的影响

Fig. 2 Effect of ocean tide loading on troposphere delay estimate

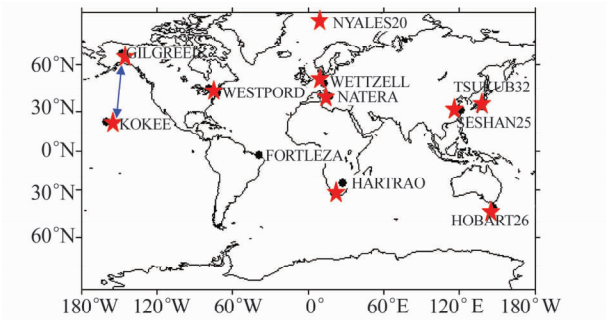


图3 全球 IGS 连续跟踪站分布图

Fig. 3 Distribution of IGS continuous tracking stations

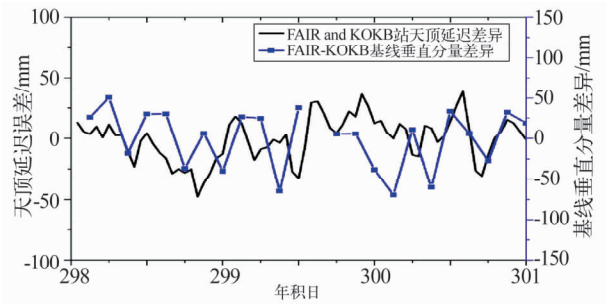


图4 FAIR-KOKB 基线垂直分量变化与对流层天顶延迟变化比较图

Fig. 4 Comparion the change of vertical component of base-line and troposphere delay estimate values of FAIR-KOKB baseline

FAIR-KOKB GPS 基线垂直分量的变化相匹配。

为了得到海潮负荷对对流层天顶延迟测定的影响与测站高程影响的关系,以上海站 (SHAO) 为例,分别采用方案一与方案二得到测站对流层延迟值,从而得到两方案间的差异,即海潮负荷对测站对流层天顶延迟的影响,同时根据 FES2004 模型提供的潮波参数计算得出海潮负荷对上海站高程值在对应时间内的影响,如图 5 所示。

由图5可以看出,海潮负荷对沿海的上海测站

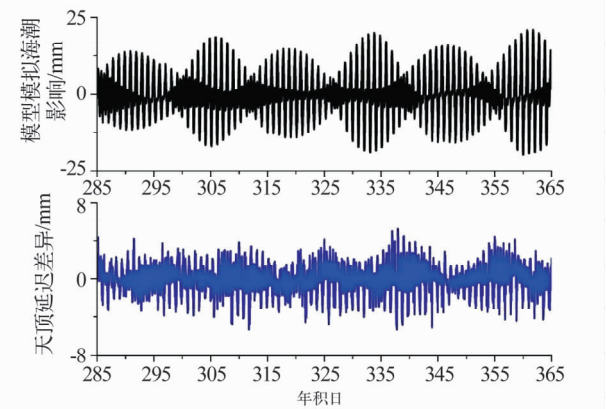


图5 海潮负荷对测站对流层天顶延迟及测站高程的影响图

Fig. 5 Effect of ocean tide loading on troposphere delay estimate and elevation of SHAO station

高程的影响达 cm 级,对对流层天顶延迟测定的影响约为 5 mm,且海潮负荷对测站高程和对流层天顶延迟测定影响的时间序列值都存在明显的周期性。根据图 5,可以得到海潮负荷对对流层天顶测定及测站高程影响的关系,如图 6。

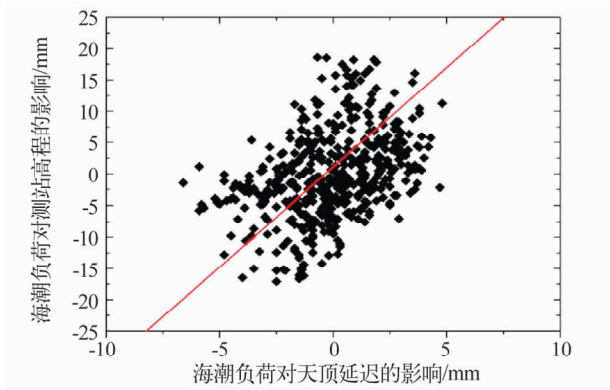


图 6 海潮负荷对测站对流层天顶延迟及测站高程影响的关系

Fig. 6 The relationship of ocean tide loading effect on troposphere delay estimate and elevation

由图 6 可以得到,海潮负荷对测站对流层延迟的影响与海潮负荷对测站高程影响存在一种近似线性的关系(存在 $y = 3.0x$,斜率为 3 的关系)。这也说明,海潮负荷改正对对流层延迟测定很重要,若没有精确的海潮模型进行海潮负荷改正,会影响对流层天顶延迟估计值。

方案一与方案二可分别得到对流层天顶延迟估计的时间序列值,两套时间序列结果如图 7 所示。图 8 是分别对图 7 中的两方案的时间序列进行快速傅里叶变换得到的功率谱密度。

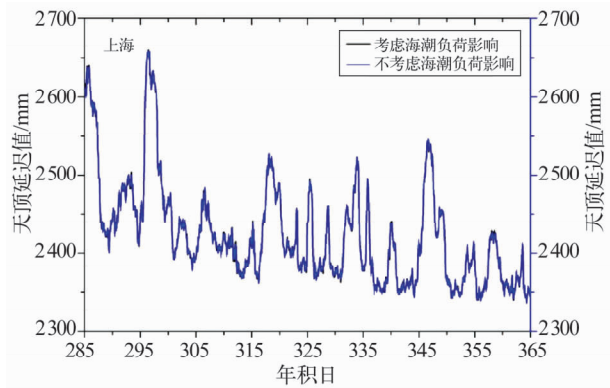


图 7 对流层天顶延迟值时间序列图

Fig. 7 Troposphere zenith delay time-series values

图 7 是由方案一与方案二分别得到的上海站 2010 年年积日第 285 ~ 365 d 的对流层天顶延迟值。由于海潮负荷对对流层天顶延迟影响的量级较小,因此图 7 中两方案的差异并不明显。由图 8 可以明显看到,点线和实线在半天附近有明显差异,这是由

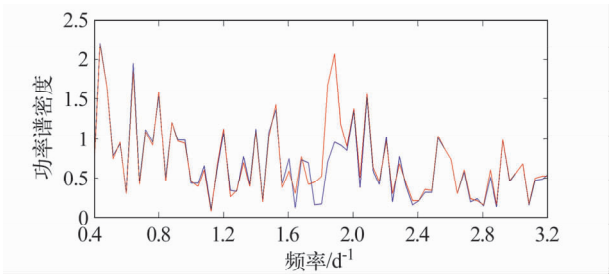


图 8 对流层天顶延迟时间序列值频谱分析结果图(实线代表加海潮负荷改正;点线代表不加海潮负荷改正,纵坐标单位为 mm)

Fig. 8 Spectrum analysis of troposphere zenith delay time-series values (Line is ocean tide loading correction, point is no ocean tide loading correction, unit of Y Axis is millimeters)

于在上海站海潮负荷起主要影响的 M2 潮波的周期为 12.42 h,不加海潮负荷改正在功率谱密度的图中会存在很明显的波峰,而加了海潮负荷改正的在不加海潮改正的波峰处会明显削弱,说明加入海潮改正后对海潮负荷的抑制起到了好的效果。

3 结 论

1)海潮负荷对 GPS 测站高程的影响在沿海测站达 cm 级,在考虑和不考虑海潮负荷效应时,利用 GPS 观测数据解算的对流层天顶延迟值的差异是 mm 级,且沿海测站差异远大于内陆测站;

2)海潮负荷对测站对流层延迟估计的影响与其对测站高程的影响存在一种弱线性关系,进行海潮负荷改正可以明显消除海潮潮波的负荷影响,对精确估计对流层天顶延迟和测站高程有指导意义。

参 考 文 献

- 1 王志强,吴斌,周旭华,等. 海潮对天顶延迟测定的影响[J]. 天文学报,2003,44(3):318-323. (Wang Zhiqiang, Wu Bin, Zhou Xuhua, et al. Effectct of ocean tide on the determination of zenith delay[J]. Acta Astronomica Sinica, 2003,44(3):318-323)
- 2 周江存,孙和平. 海潮负荷对 GPS 基线的影响[J]. 大地测量与地球动力学,2005,25(4):27-32 (Zhou Jiangcun, Sun Heping. Effect of ocean tide loading on GPS baseline measurement [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005,25(4):27-32)
- 3 陈宪东. GPS 精密定位中的海潮负荷改正[J]. 西南交通大学学报,2006,41(4):429-441. (Chen Xiandong. Ocean tide loading corrections in GPS precise positioning[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006,41(4):429-441)
- 4 Svey, Calais E, Lubes M. GPS measurements of ocean loading and its impact on zenith tropospheric delay estimate: a case

- study in Brittany, France[J]. Journal of Geodesy, 2002, 76: 419 – 427.
- 5 Vergnolle M, Bouin M N, Morel L. GPS estimates of ocean tide loading in NW-France; determination of ocean tide loading constituents and comparison with a recent ocean tide model[J]. Geophys J Int, 2008, 173: 444 – 458.
 - 6 赵红, 张勤, 黄观文, 等. 基于不同海潮模型研究海潮负荷对GPS精密定位的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(5): 108 – 112. (Zhao Hong, Zhang Qin, Huang Guanwen, et al. Effect of ocean tide loading on GPS precise positioning based on different ocean tide models[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(5): 108 – 112)
 - 7 Yuan Linguo, Chao B F. Analysis of tidal signals in surface displacement measured by a dense continuous GPS array[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012(8): 355 – 356.
 - 8 周江存, 孙和平. 近海潮汐效应对测站位移的负荷影响[J]. 地球物理学报进展, 2007, 22(5): 1 340 – 1 344. (Zhou Jiangcun, Sun Heping. The load effect of local tide on displacement[J]. Process in Geophysics, 2007, 22(5): 1 340 – 1 344)
 - 9 袁林果, 丁晓利, 孙和平, 等. 利用GPS技术精密测定香港海潮负荷位移[J]. 地球科学, 2010, 40(6): 699 – 714. (Yuan Linguo, Ding Xiaoli, Sun Heping, et al. Determination of ocean tide loading displacements in Hong Kong using GPS technique [J]. Earth Sciences, 2010, 40(6): 699 – 714)
 - 10 周旭华, 吴斌, 李军. 高精度大地测量中的海潮位移改正[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 327 – 330. (Zhou Xuhua, Wu Bin, Li Jun, et al. Ocean tide displacement corrections in high precision geodesy[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(4): 327 – 330)

(上接第62页)

不同观测值精度和不同初值偏差对月球车动态定位精度的影响。通过仿真结果可以看出:

1) 基于“当前”速度模型可以得到高精度的速度与位置值;

2) 时延观测值的精度对定位结果有很大影响, 因此, 改善观测值精度是保证高精度定位结果的关键;

3) 月球车和着陆器一定范围内的初始位置偏差(本文的条件为10 km)对定位结果的影响不大, 此时可以忽略初始位置偏差的影响。

参 考 文 献

- 1 乔书波, 李金岭, 孙付平. VLBI在探月卫星定位中的应用分析[J]. 测绘学报, 2007, 36(3): 262 – 268. (Qiao Shubo, Li Jinling, Sun Fuping. Application analysis of lunar exploration satellite positioning by VLBI technique[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(3): 262 – 268)
- 2 Wei Erhu, et al. Simulation and results on real-time positioning of Chang'e-3 rover with the same-beam VLBI observations[J]. Planetary and Space Science, 2013, 84: 20 – 27.
- 3 Wei Erhu, et al. Improvement of Earth orientation parameters estimate with Chang'e-1 Δ VLBI observations[J]. Journal of Geodynamics, 2013, 72: 46 – 52.
- 4 魏二虎. 我国空间VLBI系统的有关设计和模拟计算研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006. (Wei Erhu. Research on the designment of Chinese space VLBI system and computation simulation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2006)
- 5 郑勇. VLBI大地测量[M]. 北京: 解放军出版社, 1999. (Zheng Yong. Geodesy on VLBI[M]. Beijing: PLA Publishing House, 1999)
- 6 叶叔华, 钱志瀚. VLBI: 深空探测的重要手段[N]. 科学时报, 2007 – 12 – 10. (Ye Shuhua, Qian Zhihan. VLBI: An important method of deep space exploration [N]. Science Times, 2007 – 12 – 10)
- 7 魏二虎, 易慧, 刘经南. 月球探测器差分VLBI测量的模型及可估计参数研究[J]. 测绘通报, 2011(1): 1 – 4. (Wei Erhu, Yi Hui, Liu Jingnan. On the differential VLBI model and estimable parameters with Lunar probe[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(1): 1 – 4)
- 8 洪晓瑜. VLBI技术的发展和“嫦娥工程”中的应用[J]. 自然杂志, 2007, 29(5): 297 – 299. (Hong Xiaoyu. VLBI techniques and application in the Chang'e Lunar orbiter [J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(5): 297 – 299)
- 9 Zhou Z, Shen Y, Li B. A windowing-recursive approach for GPS real-time kinematic positioning [J]. GPS Solutions, 2010, 14(4): 365 – 373.
- 10 Moore M, Wang J. An extended dynamic model for kinematic positioning[J]. The Journal of Navigation, 2003, 56(1): 79 – 88.
- 11 Helferty J P. Improved tracking of maneuvering targets: The use of turn-rate distributions for acceleration modeling[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(4): 1 355 – 1 361.
- 12 万德钧, 房建成, 王庆. GPS动态滤波理论、方法及其应用[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2000. (Wan Dejun, Fang Jiancheng, Wang Qing. Theory, method and application of GPS dynamic filter [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2000)
- 13 The International Terrestrial Reference Frame [EB/OL]. <http://itrf.ensg.ign.fr/>.