

引文格式:曹士龙,刘根友,王生亮,等.GPS超长基线解算的误差特性与精度分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(2):260-267.DOI:10.13203/j.whugis20200322



Citation: CAO Shilong, LIU Genyou, WANG Shengliang, et al. Bias Characteristics and Accuracy Analysis of GPS Ultra Long Baseline Solution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(2): 260-267. DOI: 10.13203/j. whugis20200322

GPS超长基线解算的误差特性与精度分析

曹士龙^{1,2} 刘根友¹ 王生亮^{1,2} 高铭^{1,2} 尹翔飞^{1,2}

1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

2 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京,100049

摘要:基于单基站的超长基线定位技术在地壳形变监测、高精度授时等领域具有广泛应用,但仍有诸多因素制约着超长基线解算精度。从观测方程出发,利用单差观测值对长(超长)基线(146~1 724 km)解算中的卫星轨道误差、对流层延迟误差、地球潮汐误差和相位缠绕误差等误差特性进行了详细分析。分析结果表明,当基线小于500 km时广播星历误差可忽略不计;超过500 km时需要采用精密星历,同时需要考虑地球潮汐误差的影响;利用参数估计法同时估计基线两端的天顶对流层延迟误差可获得1~2 cm精度;相位缠绕误差对基线小于2 000 km的解算影响可忽略。基于估计天顶对流层延迟的方法解算了5条长(超长)基线(146 km、491 km、837 km、1 043 km和1 724 km)。实验结果表明,当基线小于500 km时,采用广播星历可获得水平方向优于0.05 m、高程方向优于0.08 m的定位精度;当基线小于2 000 km时,采用超快速精密星历可获得水平方向优于0.025 m、高程方向优于0.055 m的定位精度。解算的初始收敛时间随着基线长度增加而缩短。

关键词:超长基线;天顶对流层延迟;地球固体潮;相位缠绕

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2021-03-19

DOI:10.13203/j.whugis20200322

文章编号:1671-8860(2023)02-0260-08

Bias Characteristics and Accuracy Analysis of GPS Ultra-Long Baseline Solution

CAO Shilong^{1,2} LIU Genyou¹ WANG Shengliang^{1,2} GAO Ming^{1,2} YIN Xiangfei^{1,2}

1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Objectives: Considering the advantages of low cost, simple algorithm model and high accuracy, the ultra-long baseline positioning technology was widely used in the fields of crustal deformation monitoring and high-precision timing. However, there are still many factors that may reduce the accuracy of the ultra-long baseline solution, such as satellite orbit error, tropospheric delay error and solid earth tide, etc.

Methods: In this contribution, characteristics of various errors and bias (such as broadcast ephemeris orbit error, tropospheric delay error, earth tide and phase windup) were analyzed based on ionosphere-free combination model. The rule of error changing with baseline length was analyzed using single difference observations of long (ultra-long) baselines (146~1 724 km).**Results:** The results show that broadcast ephemeris error could be neglected while baseline is less than 500 km. When baseline length exceeded 500 km, precise ephemeris was needed to reduce the influence of orbital errors on positioning. The accuracy of the zenith tropospheric delay calculated by GPT2+Saastamoinen model ranged from centimeter to decimetre, and the method of simultaneously estimating zenith tropospheric delays at both stations could provide accu-

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0501900);国家自然科学基金(41774017,41621091)。

第一作者:曹士龙,博士,主要从事GNSS精密定位算法研究及应用。caoshilong2006@163.com

通讯作者:刘根友,博士,研究员。liugy@whig.ac.cn

racy of 1~2 cm. Compared with the horizontal direction, the vertical direction of long baseline was more significantly affected by solid Earth tides which must be corrected in the solution of long baseline. Phase wind-up error could be neglected while baseline is less than 2 000 km. **Conclusions:** The experimental results of five long (ultra-long) baselines (146 km, 491 km, 837 km, 1 043 km and 1 724 km) solutions were presented using estimating zenith tropospheric delays at both stations of baseline. While baseline is less than 500 km, the positioning precision based on broadcast ephemeris is better than 0.05 m and 0.08 m in horizontal and vertical direction, respectively. While baseline is less than 2 000 km, the positioning precision based on ultra-rapid precise ephemeris is better than 0.025 m and 0.055 m in horizontal and vertical directions, respectively. The initial convergence time of the baseline solution decreased as the lengths of baseline increased.

Key words: ultra-long baseline; zenith tropospheric delay; solid Earth tides; phase wind-up

为了保证全球定位系统(global positioning system, GPS)差分定位精度,基线距离通常被控制在30 km以内。精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术摆脱了对基准站的依赖,可在全球范围内获得高精度定位结果,但PPP依赖于高精度卫星轨道和钟差产品,存在初始化时间长和动态性能较差等问题。网络实时动态差分(real time kinematic, RTK)可提高初始化速度,但需要较大规模的参考站网作为基础,在一些偏远山区和远海岛礁等区域,网络RTK的实现困难较大。本文所指的长基线为100~500 km距离,超长基线为500 km以上距离。基于单基站的长基线定位技术由于成本低、算法模型简洁、精度高等优点,在时间同步和地壳形变监测等领域发挥着重要作用。国内外学者对长基线差分进行了大量研究^[1~7]。文献[1]用超长基线双差瞬时精密定位技术分析了汶川地震动态形变特征。文献[2~3]对长基线定位中的对流层延迟、电离层延迟和模糊度固定等问题作了分析,其基线解算结果与精密单点定位结果差异很小。文献[4]利用间隔5~60 km的6个测站,对比分析了网络RTK与长距离RTK的定位结果,二者在水平方向的差异不超过3 cm,高程方向差异不超过4 cm。但这些研究中所涉及的基线长度都在100 km以内。针对更长距离基线的研究较少。文献[5]针对100 km以上的长基线,将两个测站的天顶对流层延迟双差值作为参数估计,获得了厘米级定位精度。但该模型中对两个测站的对流层延迟双差值做了近似处理,函数模型在理论上不够严密,在超长基线解算中定位误差较大。

众多学者对长基线的定位精度、模糊度固定算法等做了大量深入研究^[8~13],但针对超长基线解算中的误差特性与分析的研究较少^[14~16]。长基线差分定位中,一般采用双频观测值的无电离层

组合消除电离层延迟误差的影响,其他误差主要包括卫星轨道误差、对流层延迟误差、卫星端和接收机端的天线相位中心偏差、地球固体潮误差和相位缠绕误差。卫星端和接收机端的天线相位中心偏差均可以通过函数模型精确改正,卫星轨道误差和对流层延迟误差成为主要误差。本文给出了长基线解算采用的单差函数模型,采用5条长(超长)基线数据(146 km、491 km、837 km、1 043 km、1 724 km),分析了卫星轨道误差、对流层延迟误差、地球固体潮和相位缠绕等误差特性及对单差观测量的影响规律,采用估计天顶对流层延迟的方法对比分析了5条长(超长)基线解算结果,给出了实验结论。

1 观测方程和函数模型

无电离层测码伪距和测相伪距的非差观测方程分别为:

$$\begin{cases} P_{r,\text{IF}}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + M_r^s Z_r + \epsilon_p \\ \lambda_1 \varphi_{r,\text{IF}}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + M_r^s Z_r + \epsilon_\varphi \\ \lambda_1 \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} N_1 - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_2 \right) + \epsilon_\varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中,上标s表示卫星;下标r表示测站; λ_1 表示L1载波波长; $P_{r,\text{IF}}^s$ 和 $\varphi_{r,\text{IF}}^s$ 分别表示无电离层组合伪距和载波相位观测量; ρ_r^s 表示站星距离;c表示光速; dt_r 和 dt^s 分别表示接收机和卫星的钟差; Z_r 表示测站r的天顶对流层延迟; M_r^s 表示测站r上卫星s的对流层映射函数; N_1 、 N_2 分别表示L1和L2载波相位整周模糊度; f_1 、 f_2 分别为L1和L2载波频率; ϵ_p 和 ϵ_φ 分别表示伪距和载波相位观测量噪声;卫星端和接收机端的天线相位偏差及变化、地球固体潮和相位缠绕等误差均改正到 ρ_r^s 中;这里不考虑多路径效应的影响。

无电离层组合伪距和载波相位观测量的具体形式如下:

$$\begin{cases} P_{r,\text{IF}}^s = (f_1^2 P_{r,1}^s - f_2^2 P_{r,2}^s) / (f_1^2 - f_2^2) \\ \varphi_{r,\text{IF}}^s = (f_1^2 \varphi_{r,1}^s - f_1 f_2 \varphi_{r,2}^s) / (f_1^2 - f_2^2) \end{cases} \quad (2)$$

本文采用站间单差分析各误差项的变化及对基线解算的影响。在长基线中,卫星相对于基准站和移动站的高度角不相等,其对流层映射函数也不相同,因此需要分别估计每个测站上的天顶对流层延迟。天顶对流层延迟中的干分量采用Saastamoinen模型法改正,而干分量的残余部分与湿分量合并,作为未知参数进行估计。基于单差观测值的函数模型如下:

$$\begin{cases} \Delta P_{rb,\text{IF}}^s = \Delta \rho_{rb}^s + c \Delta dt_{rb} + M_r^s Z_r - M_b^s Z_b + \epsilon_{\Delta P} \\ \Delta \varphi_{rb,\text{IF}}^s = \Delta \rho_{rb}^s + c \Delta dt_{rb} + M_r^s Z_r - M_b^s Z_b + \lambda_1 \Delta N_{rb,\text{IF}}^s + \epsilon_{\Delta \varphi} \end{cases} \quad (3)$$

式中, Δ 表示对应参数的站间单差值; Z_r 和 Z_b 分别表示移动站和基准站的天顶对流层湿延迟(含干延迟的部分残差); M_r^s 和 M_b^s 分别代表移动站和基准站的对流层湿分量映射函数,本文采用GMF映射函数模型。

个别文献中将基准站和移动站的天顶对流层延迟映射函数近似认为相等,将两个天顶对流层延迟参数合并为一个参数,这种方式在理论上是不严密的,仅适用于中短基线,但对于长(超长)基线,这种近似处理会产生较大的估计误差。相比之下,本文给出的单差观测值函数模型在理论上更为严密,更适合长(超长)基线解算。

2 误差分析

本文选取位于日本的5个国际全球导航卫星系统服务(international global navigation satellite system service, IGS)测站并选取其中5条基线作为实验对象,测站分布如图1所示。测站名称和基线长度如表1所示。

2.1 广播星历轨道误差

目前IGS公布的GPS广播星历轨道精度为1 m,钟差精度为2.5 ns,事后精密星历产品的轨道精度优于2.5 cm,钟差精度为20 ps^[17-19]。本文以IGS发布的精密星历作为参考值,评估TSK2测站上24 h广播星历轨道径向误差及钟差,并分析轨道误差对站星距单差值的影响。

从图2可以看出,广播星历轨道径向均方根误差(root mean square error, RMSE)小于0.5 m,最大值为1.501 m,卫星钟差的RMSE在0.6 m(等效为1.81 ns)以内。由于广播星历每2 h更新

一次,因此各颗卫星轨道误差中也存在不同程度的跳变现象。

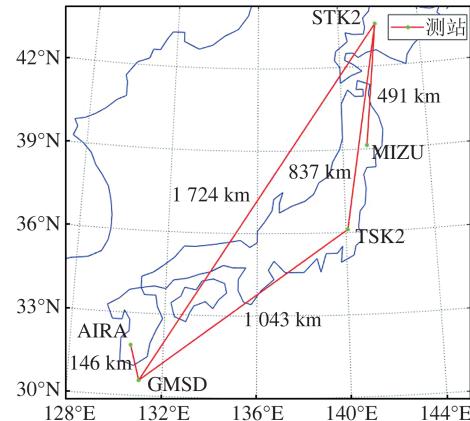


图1 基线的测站分布图

Fig.1 Distribution of Sites for Baseline

表1 基线名称及长度

Tab.1 Name and Length for Each Baseline

名称	测站	长度/km
BL1	AIRA-GMSD	146
BL2	MIZU-STK2	491
BL3	STK2-TSK2	837
BL4	TSK2-GMSD	1 043
BL5	GMSD-STK2	1 724

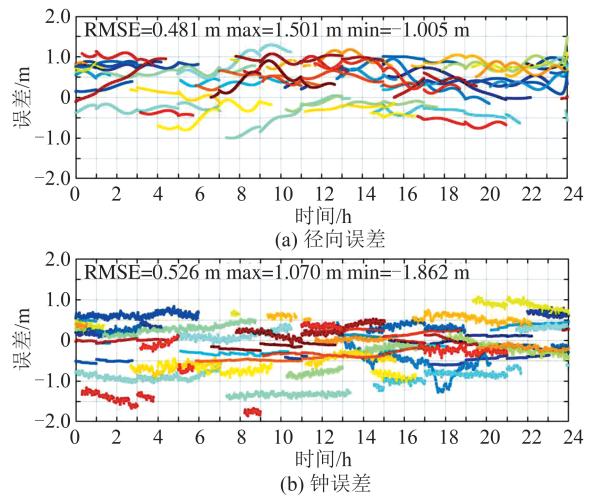


图2 TSK2站广播星历轨道径向误差和钟差
Offset at TSK2 Site

长基线解算中卫星钟差通过站间单差可完全消除,但轨道误差不能完全消除。图3是广播星历轨道误差对站间单差的影响在不同长度基线中的统计结果。

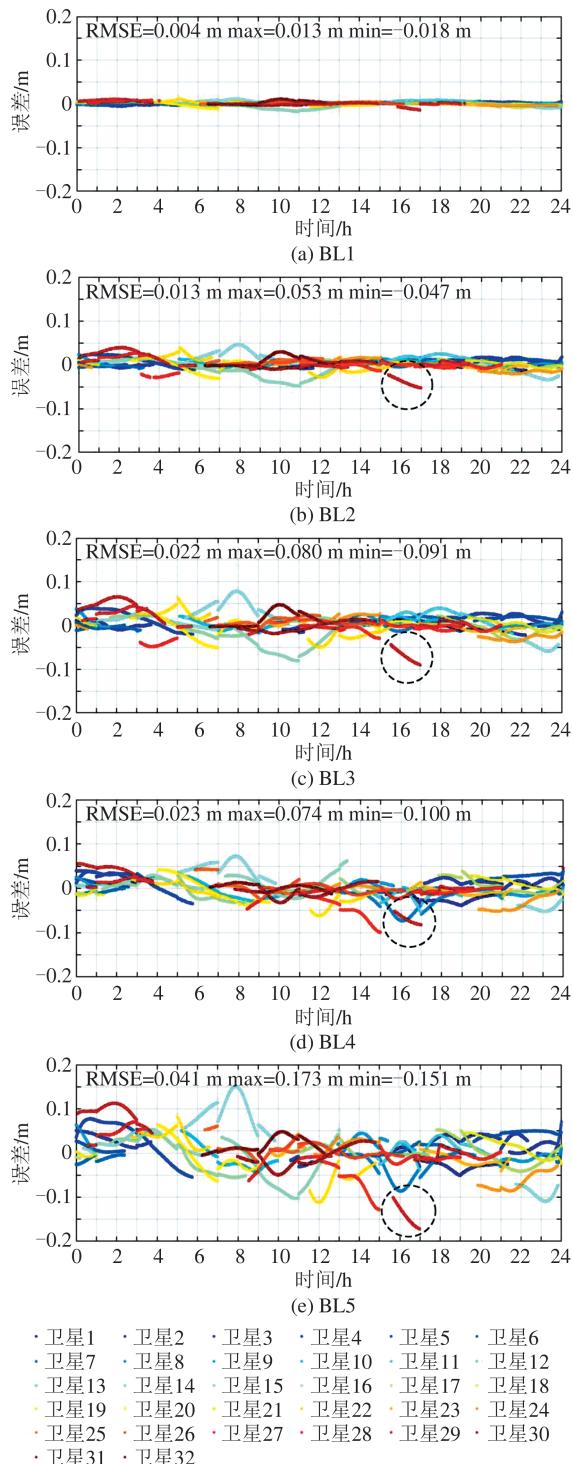


图3 不同基线中星历轨道误差对站间单差的影响
Fig.3 Effects of Broadcast Ephemeris Orbit Error on Single Difference Observation in Each Baseline

图3中个别卫星的广播星历在部分时段出现较大偏差(如12号和30号卫星,图3中黑色圆圈标注),原因是该时段内卫星的星历龄期较大,且存在非整点时刻星历更新,因此在使用广播星历时,如果卫星数足够多,为了避免星历更新异常造成的定位精度降低,应该对星历龄期较大的卫星予以剔除。

轨道误差对单差观测量影响值 ΔE_{orb} 的计算公式为^[20]:

$$\Delta E_{\text{orb}} = \max\left(\frac{1}{\rho} \|\boldsymbol{\eta}\| |\mathbf{X}| \cos \theta\right) \quad (4)$$

式中, ρ 为站星距离; $\boldsymbol{\eta}$ 为轨道误差向量; \mathbf{X} 为基线向量; θ 为轨道误差与基线向量夹角。假设站星距离为20 000 km,卫星轨道误差为0.5 m, $\cos \theta$ 值近似等于1,根据式(4)计算不同基线中星历误差对单差影响的理论值并与实测结果对比,如表2所示。

表2 广播星历轨道误差对单差的影响

Tab.2 Effects of Broadcast Orbit Error on Single Difference

名称	长度/km	实测误差/m	理论误差/m
BL1	146	0.004	0.004
BL2	491	0.013	0.012
BL3	837	0.022	0.021
BL4	1 043	0.023	0.026
BL5	1 724	0.041	0.043

实测的轨道误差对单差值影响与理论计算结果比较吻合。随着基线距离增加,广播星历轨道误差对站间单差的影响越来越大。当基线长度小于500 km时,广播星历轨道误差对单差观测量的影响不超过0.015 m,对于厘米级定位来说可以忽略不计;当基线长度超过500 km时,应采用精密星历以减小卫星轨道误差的影响。

2.2 对流层延迟误差

在长基线中大气的空间相关性较低,无法通过差分削弱对流层延迟误差。低仰角卫星的对流层延迟值可达十几米以上,是长距离基线解算中最大的误差来源^[21]。对流层延迟改正方法主要有经验模型法、参数估计法和精密产品改正。IGS公布的对流层天顶延迟产品(zenith path delay, ZPD)精度在毫米级。笔者分别利用GPT2+Saastamoinen模型法和参数估计法(采用GMF计算映射函数并实时估计)解算4个测站的天顶对流层延迟值,并与ZPD结果进行比较,分析模型法与参数估计法的精度见图4。

模型法计算的天顶对流层延迟的精度只能达到厘米至分米级,而参数估计法的精度与ZPD结果接近。表3是以ZPD结果为参考值统计的参数估计法的误差。

从表3中可知,参数估计法计算的天顶对流层延迟误差在1~2 cm,可以满足厘米级长基线定位的需求,因此在长基线解算中应采用参数估计法消除对流层延迟误差的影响。

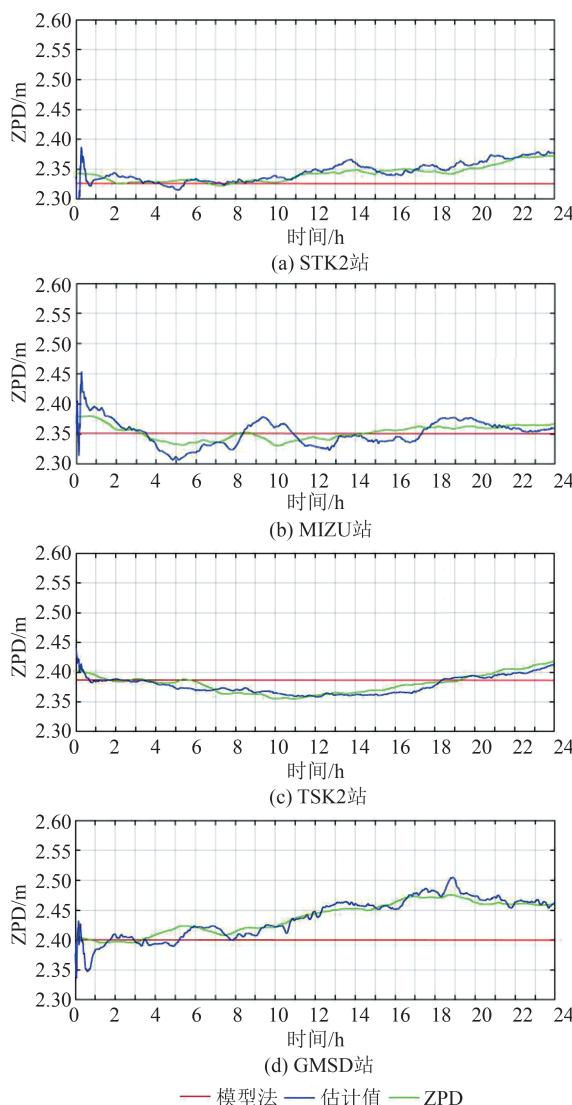


图4 不同方法计算的天顶对流层延迟对比

Fig.4 Comparison of Zenith Tropospheric Delay Calculated by Different Methods

表3 天顶对流层延迟的估计偏差/m

Tab.3 Bias Between ZPD and Estimated ZTD/m

测站名	STK2	MIZU	TSK2	GMSD
Bias	0.004	-0.001	-0.003	0.000
RMSE	0.008	0.015	0.007	0.012

2.3 地球固体潮误差

地球固体潮是指在日、月引潮力的作用下，固体地球产生的周期性形变的现象。地球固体潮在高程方向的影响可达数十个厘米^[22]。图5是5个测站上的潮汐误差在水平方向和高程方向的对比统计结果。

5个测站在水平和高程方向的最大潮汐误差值分别为0.054 m和0.134 m，高程方向的误差较大。各条基线中潮汐误差的站间单差最大值统计如图6所示。

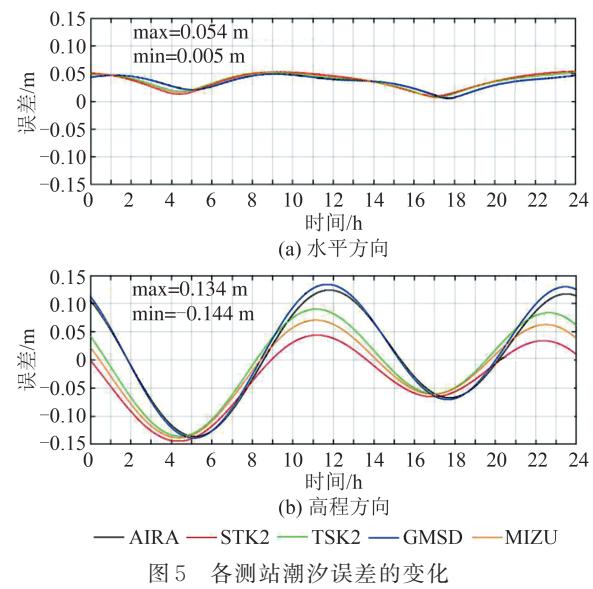


图5 各测站潮汐误差的变化

Fig.5 Variation of Tide Error at Each Site

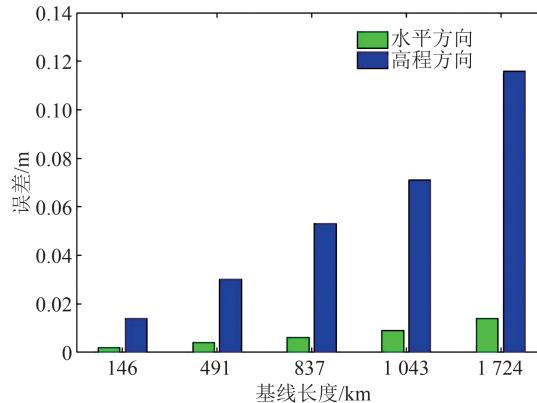


图6 各基线中潮汐误差的站间单差最大值

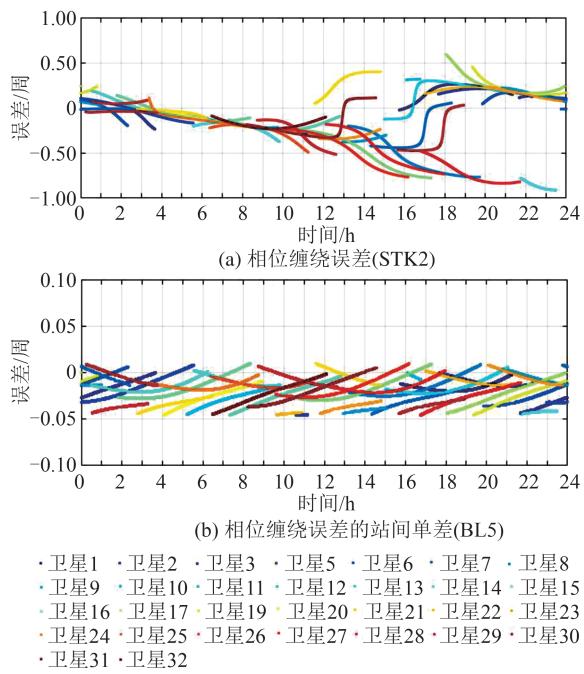
Fig.6 Max Single Differences of Tides Error Between Stations in Each Baseline

随着基线长度增加，潮汐误差的站间单差值越来越大，尤其是在高程方向。基线长度小于1 000 km时，水平方向误差不超过0.01 m，而高程方向误差大于0.01 m；当基线长度为1 724 km时，高程方向误差达到0.116 m，因此在长基线解算时，必须对潮汐误差加以改正。

2.4 相位缠绕误差

卫星在正午(子夜)机动时，或者在穿过地影时会发生姿态异常，这种姿态异常会造成较大的相位缠绕误差^[23-26]。基线BL5中两测站上的天线相位缠绕误差变化如图7所示。

从图7(a)可知，相位缠绕误差在不同时段变化不同。BL5基线两端相位缠绕误差的站间单差最大值不超过0.05周。因此在基线长度小于2 000 km的基线解算中，可以忽略相位缠绕误差的影响。



3 算例分析

笔者采用 2018 年第 335 天 5 个测站 24 h 观测数据, 采用本文的函数模型对 5 条长(超长)基线进行事后动态解算。BL1 和 BL2 采用广播星历, 其余基线采用超快速精密星历。具体解算策略如表 4 所示。

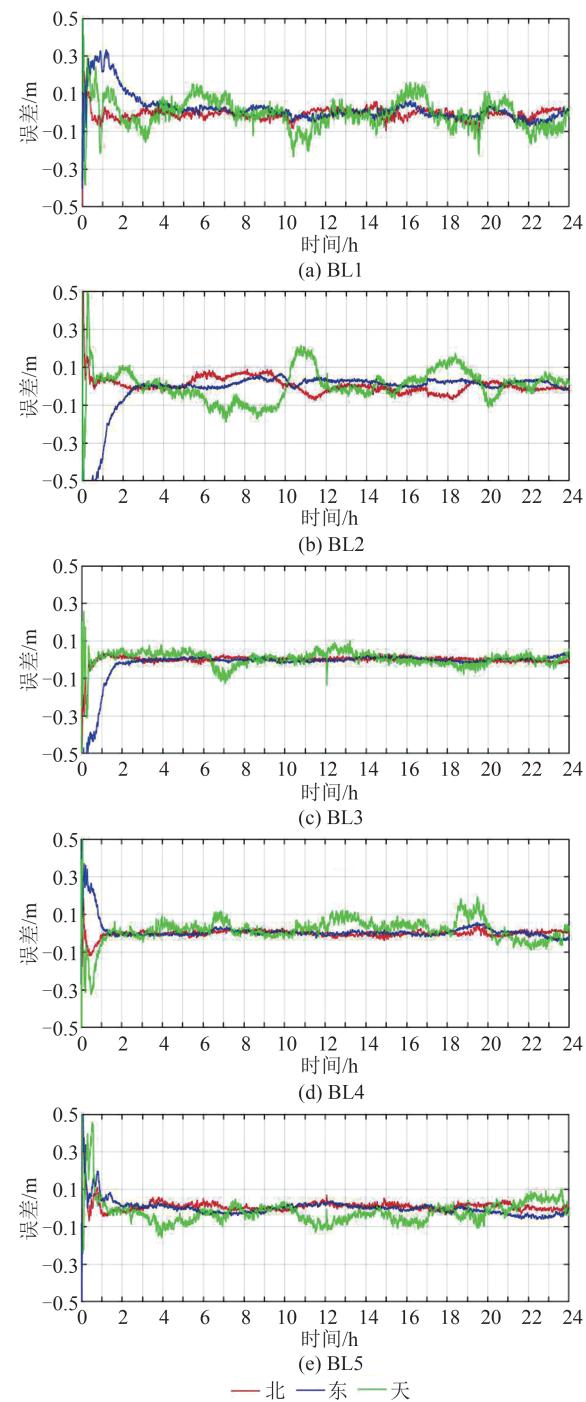
表 4 基线解算的策略
Tab.4 Baseline Solution Strategies

项目	处理策略
观测频率	GPS L1+L2
参数估计	Kalman 滤波
截止高度角/(°)	10
采样率/s	30
模糊度参数	参数估计(浮点解)
坐标参数	参数估计
电离层延迟	无电离层组合
天顶对流层干延迟	Saastamoinen 改正
天顶对流层湿延迟	GMF+随机游走模型估计
卫星星历	BL1、BL2 采用广播星历, BL3、BL4、BL5 采用超快速精密星历
天线相位改正	igs14.atx
地球固体潮改正	IERS Conventions 2010

以 IGS 公布的天解坐标值为参考, 反算各条基线在北、东和天 3 个方向分量作为真值, 将各条基线的解算结果与真值作差, 统计各条基线的误

差变化。

各条基线在北、东、天方向的误差变化如图 8 所示, 基线解算误差对比如图 9 所示。



由图 9 可知, 采用广播星历解算的北、东方向误差均在 0.04 m 以内, 天向误差在 0.08 m 以内; 采用超快速精密星历解算的北、东方向误差均在 0.025 m 以内, 天向误差在 0.055 m 以内。

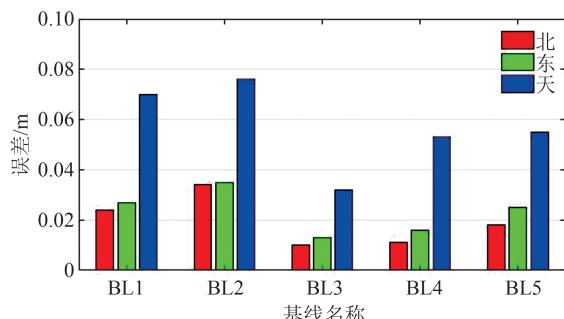


图9 基线解算误差对比

Fig.9 Errors Comparison of Baseline Solution

4 结语

本文利用5条长(超长)GPS基线数据分析了广播星历误差、对流层延迟误差、地球固体潮误差和相位缠绕误差的特性及其变化规律,结论如下:

1)基线长度在500 km以内时,广播星历误差可忽略不计;超过500 km时,应采用精密星历以减小轨道误差对定位的影响。

2)采用模型法计算天顶对流层延迟的误差可达分米级,采用参数估计法可获得1~2 cm的精度,在长基线解算中应采用参数估计法。

3)地球固体潮误差对高程的影响与基线长度呈线性增长,在长基线解算中必须加以改正;在基线长度小于1 000 km时,可忽略对水平方向的影响。

4)相位缠绕误差在基线长度在2 000 km以内时可忽略不计。

在长基线解算中,应将各测站天顶对流层延迟分别进行估计,基线长度在500 km以内时,采用广播星历解算的水平、高程方向误差分别小于0.05 m、0.08 m;当基线在500~2 000 km时,采用精密星历解算的水平、高程方向误差分别小于0.025 m、0.055 m。

随着基线长度增加,收敛时间逐渐缩短,东方向相对于其他方向收敛速度较慢。分析其原因,一方面是由于基准站和移动站上的卫星高度角差异较小,导致两个测站上的天顶对流层延迟参数之间存在一定线性相关性。随着基线长度增加,两个测站上的卫星高度角差异逐渐增加,相关性逐渐降低,从而导致收敛速度加快。另一方面是由于GPS卫星轨道倾角均为60°,卫星在东西方向的运动速度低于南北方向,导致东向收敛速度较低。后续将从多频多系统联合解算、整周模糊度固定等方面作进一步研究,以提高收敛

速度和解算精度。

参 考 文 献

- [1] Liu Gang, Tan Kai, Peng Maolei, et al. Using Ultra Long Baseline to Measure Co-seismic Kinematic Deformations of Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(5): 14-19. (刘刚, 谭凯, 彭懋磊, 等. 用超长基线解算分析汶川地震动态形变特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(5): 14-19.)
- [2] Zhang Yuxi, Zhang Xiaohong, Liu Quanhui, et al. A Method of Dynamic Positioning with the Medium and Long Baseline for Aerial Measurement Scenarios [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 871-878. (张钰玺, 张小红, 刘全海, 等. 航空测量场景下的中长基线动态定位方法[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 871-878.)
- [3] Cheng Shu, Feng Zifan. Accuracy Analysis of Medium-Long Baseline Positioning [J]. *Journal of Geomatics*, 2018, 43(1): 59-62. (成枢, 冯子帆. 中长基线的定位精度分析[J]. 测绘地理信息, 2018, 43(1): 59-62.)
- [4] Baybura T, Tiryakioğlu İ, Uğur M A, et al. Examining the Accuracy of Network RTK and Long Base RTK Methods with Repetitive Measurements [J]. *Journal of Sensors*, 2019, DOI: 10.1155/2019/3572605.
- [5] Choi B K, Roh K M, Lee S J. Long Baseline GPS RTK with Estimating Tropospheric Delays [J]. *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 2014, 3(3): 123-129.
- [6] An Xiangdong, Chen Hua, Jiang Weiping, et al. GLONASS Ambiguity Resolution Method Based on Long Baselines and Experimental Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(5): 690-698. (安向东, 陈华, 姜卫平, 等. 长基线GLONASS模糊度固定方法及实验分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(5): 690-698.)
- [7] Abidin H Z, Haroen T S, Adiyanto F H, et al. On the Establishment and Implementation of GPS CORS for Cadastral Surveying and Mapping in Indonesia [J]. *Survey Review*, 2015, 47(340): 61-70.
- [8] Yanase T, Tanaka H, Ohashi M, et al. Long Baseline Relative Positioning with Estimating Ionosphere and Troposphere Gradients [C]// The 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2010.
- [9] Blewitt G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic

- Baselines up to 2 000 km [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B8): 10187-10203.
- [10] Gao Wang, Gao Chengfa, Pan Shuguo, et al. Fast Ambiguity Resolution Between GPS/GLONASS/BDS Combined Long-Range Base Stations Based on Partial-Fixing Strategy [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(4): 558-562. (高旺, 高成发, 潘树国, 等. 基于部分固定策略的多系统长距离基准站间模糊度快速解算 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(4): 558-562.)
- [11] Gao Xingwei, Chen Ruizhi, Zhao Chunmei. A Network RTK Algorithm and Its Test [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1350-1353. (高星伟, 陈锐志, 赵春梅. 网络RTK算法研究与实验[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(11): 1350-1353.)
- [12] Li B F, Shen Y Z, Feng Y M, et al. GNSS Ambiguity Resolution with Controllable Failure Rate for Long Baseline Network RTK [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(2): 99-112.
- [13] Zhu Huizhong, Li Jun, Yu Zeran, et al. The Algorithm of Multi-frequency Carrier Phase Integer Ambiguity Resolution with GPS/BDS Between Long Range Network RTK Reference Stations [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(3): 300-311. (祝会忠, 李军, 蔚泽然, 等. 长距离GPS/BDS参考站网多频载波相位整周模糊度解算方法[J]. 测绘学报, 2020, 49(3): 300-311.)
- [14] Li Bofeng, Shen Yunzhong, Lou Lizhi. Analysis of the Stochastic Characteristics for Medium and Long Baseline GPS Measurements [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(2): 176-180. (李博峰, 沈云中, 楼立志. GPS 中长基线观测值随机特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(2): 176-180.)
- [15] Jin S G, Luo O, Ren C. Effects of Physical Correlations on Long-Distance GPS Positioning and Zenith Tropospheric Delay Estimates [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(2): 190-195.
- [16] Xu Y, Wu C, Li L, et al. GPS/BDS Medium/Long-Range RTK Constrained with Tropospheric Delay Parameters from NWP Model [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1113.
- [17] Cohenour C, Graas F. GPS Orbit and Clock Error Distributions [J]. *Navigation*, 2011, 58(1): 17-28.
- [18] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast Versus Precise Ephemerides: A Multi-GNSS Perspective [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 321-333.
- [19] Kazmierski K, Sośnica K, Hadas T. Quality Assessment of Multi-GNSS Orbits and Clocks for Real-Time Precise Point Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1), DOI: 10.1007/s10291-017-0678-6.
- [20] Han S. Carrier Phase-Based Long-Range GPS Kinematic Positioning [D]. Sydney, Australia: University of New South Wales, 1997.
- [21] Chen Junping, Wang Jungang, Wang Jiebian, et al. SHAtrup: Empirical ZTD Model Based on CMONOC GNSS Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(11): 1588-1595. (陈俊平, 王君刚, 王解先, 等. SHAtrup: 基于陆态网GNSS数据的中国大陆区域ZTD模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(11): 1588-1595.)
- [22] Yin H T, Li J, Ma P F, et al. Effect of Solid-Earth-Tide on GPS Time Series [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2010, 1(1): 64-69.
- [23] Wang Jiachen, Liu Genyou, Guo Aizhi, et al. Antenna Phase Wind-Up Error Analysis of GNSS Relative Positioning Double-Difference Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 38-45. (王嘉琛, 刘根友, 郭爱智, 等. 相对定位双差模型中的天线相位缠绕误差分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 38-45.)
- [24] Ye Shirong, Xia Fengyu, Zhao Lewen, et al. Impact Analysis of Yaw Attitude on BDS Precise Point Positioning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(8): 971-977. (叶世榕, 夏风雨, 赵乐文, 等. 偏航姿态对北斗精密单点定位的影响分析[J]. 测绘学报, 2017, 46(8): 971-977.)
- [25] Wang Chen, Guo Jing, Zhao Qile. Impact of Yaw Attitude on GPS/GLONASS Orbit and Clock Solutions [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(5): 624-629. (王晨, 郭靖, 赵齐乐. 偏航姿态对GPS和GLONASS精密轨道和钟差的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(5): 624-629.)
- [26] Dilssner F. GPS IIF-1 Satellite: Antenna Phase Center and Attitude Modeling [J]. *Inside GNSS*, 2010, 5(6): 59-64.