基于GNSS加密网的VLBI电离层时延修正方法

周伟莉^{1,2,3},宋淑丽¹,李培佳¹,张志斌^{1,3},黄 超^{1,3},黄 勇^{1,3},王广利¹

(1. 中国科学院上海天文台,上海 200030; 2. 中国科学院国家空间科学中心,北京 100190; 3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 基于全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)反演的电离层模型是甚长基线干涉 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI)网(Chinese VLBI Network, CVN)电离层时延修正的有效方法。由于国际 GNSS服务组织(International GNSS Services, IGS)跟踪网在中国区域较稀疏,针对探月工程高精度需求,提出了加密 GNSS跟踪网的处理策略,构建了全球电离层精修正模型(ShangHai Astronomical Observatory, SHAO),并与欧洲定轨中 心发布的全球电离层修正模型(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)作对比。结果表明:在电离层平静期,采 用两种模型计算的CVN站电离层时延相对均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)最大1.23 ns;在电离层活跃期, CVN站的电离层时延RMSE最大达16.80 ns。在电离层处于活跃期时,基于SHAO模型的VLBI定轨残差相比CODE模型在 S1波段由6.07 ns提高到3.33 ns, S2波段由9.10 ns提高到7.07 ns, X0波段由0.70 ns 提高到0.60 ns。

关键词: 探月工程; VLBI; 电离层时延; GNSS

中图分类号: P135, P164 文献标识码: A 文章编号: 2095-7777(2020)04-0362-09 **DOI**:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200056

引用格式:周伟莉,宋淑丽,李培佳,等.基于GNSS加密网的VLBI电离层时延修正方法[J].深空探测学报(中英文),2020,7(4):362-370.

Reference format: ZHOU W L, SONG S L, LI P J, et al. Ionospheric TEC correction for VLBI based on GNSS density network[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7 (4) : 362-370.

引 言

测轨分系统是中国探月工程和深空探测的重要组成部分,其任务是采用甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)测量技术进行探测器轨道确定^[14]。我国的VLBI测控网包括北京(BJ)、天马(TM)、昆明(KM)和乌鲁木齐(UR)4个射电望远镜台站和位于上海的1个VLBI数据处理中心。VLBI技术基于最小二乘法拟合相位信息,获取理论时延和时延率,在对探测器进行跟踪测量的过程中,无线电信号穿过中性大气和电离层时会产生时延,从而引起时延误差。中性大气时延修正可以通过模型和全球定位系统(Global Positioning System, GPS)观测数据计算天顶时延,然后采用映射函数投影到探测器观测方向,获取斜路径方向的中性大气时延量,或者采用微波辐射计直接观测斜路径时延。

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)和电离层有着紧密的联系,卫星信号 在穿过电离层时会受到其折射的影响带来一定的时延

误差;利用该折射的影响可通过GNSS反演获得电离层 时延量。由于GNSS具有全天候、高精度和易布站优 点,国际上主要采用GNSS反演获取的全球电离层修正 模型消除电离层时延的影响。早在1986年,Lanyi就利 用GPS卫星数据,采用多项式模型构建了区域电离层 改正模型^[5],从而开启了利用GNSS数据反演电离层模 型的新方法。

国际GNSS服务(International GNSS Services, IGS)下设电离层工作组,包括欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)、美国喷气 推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)、欧洲 航天局(European Space Agency, ESA)等多家机构。 他们对全球发布高精度的电离层模型产品,包括:基 于球谐函数建立的模型、基于三次样条函数建立的模 型和基于三维像素建立的电离层模型等。李子申等对 IGS各家电离层模型精度进行了评估分析^[6]。从评估结 果可以看出,欧洲定轨中心提供的基于球谐函数建立的 电离层模型产品精度相对最优。近年来,国际GNSS 监测评估系统(international GNSS Monitoring & Assessment

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0501503);国家自然科学基金资助项目(41730109)

收稿日期: 2020-06-15 修回日期: 2020-08-10

1.10

System, iGMAS) 也在提供电离层模型产品⁷⁷。

从当前电离层模型研究的总体状态来看,要想提 高电离层时延修正精度,可以从观测网处理策略和模 型算法等方面开展深入研究。针对探月工程VLBI测站 的高精度应用需求,主要从观测网处理策略方面开展 研究,以提高电离层时延修正精度。目前国际上基于 GNSS反演的全球电离层修正模型(CODEZ)采用中 国区域的测站作为全球GNSS服务站,但是目前在中国 区域的IGS GNSS跟踪网较稀疏,且有时数据中断。为 了提高中国区域电离层时延修正精度,即提高VLBI技 术定轨精度,采用中国区域GNSS网加密的处理策略, 构建了全球电离层时延精修正模型(ShangHai Astronomical Observatory,SHAO)。由于目前欧洲定轨中心提供 的电离层模型精度代表了目前国际先进水平,本文基 于探月工程实际任务,对比了SHAO全球电离层时延精 修正模型与欧洲定轨中心全球电离层修正模型的精度。

1 全球电离层时延精修正模型

本文采用GNSS观测数据反演构建了全球电离层精 修正模型,该模型采用15×15阶球谐函数表达式,并 且2 hr提供一组球谐系数。

1.1 基本原理

为了便于电离层模型化,通常将整个电离层看作 是围绕地球一定高度的薄层,薄层高度300~500 km之 间。基于GNSS反演的电离层模型其伪距*P_i*和相位ø_i的 观测方程分别为

$$P_{i} = \rho - \frac{40.3}{f_{i}^{2}} TEC + b_{i}^{s} - b_{ri} + \Delta$$
(1)

$$\emptyset_i = \rho + \frac{40.3}{f_i^2} TEC - N_i \lambda_i + b_i^s - b_{ri} + \Delta$$
(2)

其中: ρ为接收机至卫星的几何距离,包含卫星到地面 几何距离、对流层时延、卫星钟差和接收机钟差及其 与频率无关的项等; b_i^{*}和b_{ri}分别为频率i的卫星硬件时 延和接收机硬件时延; λ_i为对应频率i的波长; N_i为整 周模糊度; Δ为测量噪声和多路径效应等。

对GNSS观测数据进行反演,模型时间域使用分段线 性函数(Piece-Wise Linear, PWL)进行约束,处理间隔 为2 hr,电离层模型一天分为13组,实现分段建模:采用 最小二乘法参数估计获取电离层球谐函数表达(SHAO)。 全球电离层精修正模型球谐函数表达式为

$$VTEC = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{n} \tilde{P}_{nm} \times \\ \sin\beta \left(\tilde{C}_{nm} \cos\left(m\alpha\right) + \tilde{S}_{nm} \sin\left(m\alpha\right) \right)$$
(3)

$$M(z) = \left(1 - \sin^2 z / \left(1 + H_{ion}/R_{\rm E}\right)\right)^{-1/2} \tag{4}$$

其中: *VTEC*为电离层垂直总电子含量(Vertical Total Electron Content); *n、m*为球谐函数的阶次, n_{max} 为 球谐函数的最高阶数(本文取15); α 为穿刺点经度; β 为穿刺点纬度; \tilde{P}_{nm} 为正规化勒让德函数; \tilde{C}_{nm} 和 \tilde{S}_{nm} 为待估球谐函数的系数,即全球电离层精修正模型 系数; M(z)表示与高度角z相关的投影函数; H_{ion} 表示电离层单层高度(本文取450 km); $R_{\rm E}$ 表示地球平 均半径; *z*为卫星高度角。

基于探月工程探测器星历和CVN测站坐标,获取 探测器的高度角和方位角,计算CVN站与探测器方向 上的电离层时延和时延率,为VLBI技术定轨消除电离 层时延影响。

本文利用偏差*Bias*和均方根误差*RMSE*比较两种模型性能,定义如下:

$$Bias = \langle Ion_s - Ion_c \rangle \tag{5}$$

$$RMSE = \sqrt{\left\langle \left(Ion_s - Ion_c\right)^2 \right\rangle} \tag{6}$$

其中:(〉表示给定周期的平均值; *Ion*_s表示用SHAO模型计算的电离层时延值; *Ion*_c为采用欧洲定轨中心发布的事后全球电离层修正模型⁸¹计算的电离层时延值。

1.2 数据来源

本文构建的全球电离层时延精修正模型采用的GNSS跟踪站数据包括IGS跟踪站网^[9]和中国大陆构造环境监测网络(Crustal Movement Observation Network Of China, CMONOC)^[10]。IGS跟踪站网是一个大规模、高精度的GNSS全球网络,本文选取了全球均匀分布的112个IGS测站的观测资料,其位置信息如图1所示。为了提高CVN站的电离层时延修正精度,采用CMONOC观测数据进行加密,选取了CMONOC的123个测站参与建模,这些GNSS站几乎覆盖整个中国大陆,CMONOC站和4个CVN站位置分布如图2所示。



Fig. 1 Global distribution of IGS stations



图 2 CMONOC(红色圆点)和CVN站(浅蓝色五角星)分布图 Fig. 2 Locations of CMONOC(red dot) and CVN (blue pentagram) stations

2 电离层时延精度分析

目前,常用的电离层时延修正方法是双频消除法 和GNSS反演模型法。对于双频消除法,利用S双频计 算电离层改正公式为

$$\tau_0 = \frac{\tau_2 f_2^2 - \tau_1 f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} \tag{7}$$

其中: *f*₁和*f*₂表示频段的两个频率; *τ*₁和*τ*₂是对应两个 频率的观测时延值。

由误差传播定律, 电离层时延形式误差为

$$\sigma_{\tau_0} = \sqrt{\frac{f_1^4 \sigma_{\tau_1}^2 + f_2^4 \sigma_{\tau_2}^2}{(f_2^2 - f_1^2)^2}} \tag{8}$$

其中: σ_{τ_1} 和 σ_{τ_2} 分别为两个频段下的观测时延精度。

电离层时延的影响与观测频率的平方成反比,如 在22 GHz波段,1 TECU(Total Electron Content Unit)对应于约0.8 mm的误差,而在2.2 GHz波段就会 达到约8 cm。因此,电离层对低频观测时延的影响较 大,高频(10 GHz以上)影响为小量。"嫦娥4号" (CE-4)中继星VLBI信标采用S波段(2 GHz),电离 层时延是观测时延的主要误差源。CE-4和"嫦娥5号"再 入返回飞行试验(CE-5T1)定轨时延精度要求分别优 于5 ns和4 ns;对于S波段,电离层时延修正精度要优 于2 ns。

对于S频段,S1和S2信号对应的频率分别为2210 MHz 和2234 MHz。假设两个信标时延的测定精度均为 1 ns,则由此可计算得出 σ_{τ_0} 的值为66 ns,等效于20 m。 在实际的探月工程中,由于对定轨具有实时性需求, 深空VLBI观测所用单通道带宽以及整个频带跨度无法 像测地VLBI一样做宽,且因实时任务无法保证探测器 观测信标全部开启,并不适合采用双频法实时消除电 离层影响。 电离层时延与太阳活动、纬度和季节变化紧密相关^[11-13],4个CVN测站纬度差异较大,需对4站电离层时 延分别进行比对分析。太阳活动存在一个11年周期, 根据电离层活跃情况,分电离层平静期和活跃期两种 方案进行模型比对。

2.1 电离层平静期

选取了CE-4中继星任务中2018年5月3次观测 s8529a、s8530a和s8531a进行精度分析。根据射电源和 探测器星历,计算射电源和探测器的高度角方位角信 息,然后结合SHAO和CODE模型的电离层球谐系数文 件计算得到对应2 GHz的各CVN站电离层时延和时延 率。并按观测弧段分别进行统计,分别给出观测代码 s8529a、s8530a和s8531a3次观测的TM、BJ、KM和 UR测站时延和时延率结果,如表1和表2所示。

表 1 电离层平静期两种模型计算的CVN站电离层 时延精度比较

Table 1 Comparison of ionosphere delay at CVN stations using SHAO or CODE model with the quiet period

						115
时延		Bias			RMSE	
弧段	s8529a	s8530a	s8531a	s8529a	s8530a	s8531a
BJ	1.15	0.70	0.39	1.23	0.84	0.54
KM	1.03	0.73	0.36	1.11	0.89	0.50
UR	0.87	1.06	0.91	1.02	1.21	1.10
ТМ	0.79	0.51	0.29	0.97	0.71	0.37

注:本文电离层时延和时延率均基于2 GHz。

表 2 电离层平静期两种模型计算的CVN站电离层 时延率精度比较

Table 2 Comparison of ionosphere delay rate at CVN stations using SHAO or CODE model with the quiet period

				$(\mathbf{ps} \cdot \mathbf{s}^{-1})$		
时延		Bias			RMSE	
弧段	s8529a	s8530a	s8531a	s8529a	s8530a	s8531a
BJ	0.19	0.21	0.23	0.21	0.24	0.27
KM	0.14	0.14	0.14	0.23	0.19	0.20
UR	0.11	0.13	0.14	0.22	0.15	0.16
ТМ	0.16	0.16	0.17	0.13	0.20	0.20

图3给出了利用SHAO和CODE模型在电离层平 静期频率2GHz的CVN站电离层时延值。两种模型计 算的测站时延均在10.0ns以内,时延率在0.9ps/s以 内。表1和表2分别是电离层平静期采用两种模型分别计算 的CVN站电离层时延和时延率比较。从结果可以看出, 两种模型计算的时延值RMSE在1.3ns以内,时延率 RMSE在0.5ps/s以内,不同纬度带各CVN站差异较少。



图 3 s8531a观测对应两种模型下CVN站电离层时延和时延率的比较,绿色表示两者差值 Fig. 3 Comparisons of ionosphere delay &rate at CVN stations using SHAO and CODE model on s8531a, the difference of two presents in green

2.2 电离层活跃期

2014年电离层处于活跃期,结合再入返回飞行试验(CE-5T1)任务,选取了2014年10月s4a24a和s4a25a两次观测进行精度分析。图4给出了利用SHAO和CODE模型分别计算的CVN站电离层时延和时

延率值。计算方式同上,将SHAO和CODE模型的电离 层球谐系数文件分别基于CE-5T1任务时探测器星历得 到对应2 GHz的各CVN站电离层时延和时延率。按观 测弧段进行统计,得到了s4a24a和s4a25a弧段的测站 (TM、BJ、KM和UR)时延和时延率结果。



图 4 s4a24a观测对应两种模型下CVN站电离层时延和时延率的比较,绿色表示两者差值

Fig. 4 Comparisons of ionosphere delay & rate of CVN stations using SHAO model and the CODE on s4a24a, the difference of two presents in green

由图4可知在电离层活跃期,TM和KM测站电离层 时延影响尤其明显,电离层时延达到100 ns,BJ和 UR测站时延相对较少,但也接近60 ns。这是由于 KM和TM测站纬度较低,电离层时延受太阳活动影响 较大,BJ和UR站纬度相对较高,受太阳活动影响相对 较小导致。表3和表4给出了两种模型计算的电离层时 延和时延率偏差和均方根误差。两种模型计算的电离 层时延RMSE最大达到16 ns,时延率RMSE达到2.8 ps/s。 尤其是相对离赤道更近的KM站,差异比较明显。

表 3 电离层活跃期两种模型计算的CVN站电离层



				ns
时延	Bi	as	RM	1SE
弧段	s4a24a	s4a25a	s4a24a	s4a25a
BJ	6.73	3.19	7.40	3.56
KM	6.81	14.34	10.11	16.80
UR	2.83	4.18	3.08	4.26
TM	8.62	7.73	9.78	11.10

3 定轨残差分析

由于电离层平静期两种模型计算的电离层时延相

表 4 电离层活跃期两种模型计算的CVN站电离层 时延率比较精度

Table 4Comparison of ionosphere delay rate at CVN stationsusing SHAO or CODE model with the active period

			(ps·s·)		
时延	Bias		RMSE		
弧段	s4a24a	s4a25a	s4a24a	s4a25a	
BJ	1.06	0.69	1.31	0.98	
KM	2.08	1.02	2.85	1.17	
UR	0.50	0.22	0.65	0.30	
ТМ	1.98	1.23	2.80	1.70	

差在1 ns 左右, VLBI技术定轨残差的差异不大,本文 只比对电离层活跃期基于两种模型计算的电离层时延 对VLBI技术定轨的影响。

CE5T1探测器于协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)2014年10月24日 08:29:15和UTC 2014年 10月25日08:24:43分别进行了第一次和第二次中途修 正,在两次中途修正期间多次进行调姿喷气,故选取 第一次中途修正前的弧段(2014年10月24日3点20分到 7点)进行轨道确定。VLBI技术的具体轨道确定策略 见参考文献[14]

图5~8给出了S1、S2、X0和X1波段分别采用两种 电离层模型计算的探测器4个波段上CVN站基线方向上



图 5 S1波段两种模型CVN站基线方向定轨残差

Fig. 5 The difference of orbit determination residuals on S1 band at CVN stations base-line using ionosphere delay calculated by SHAO or CODE



图 6 S2波段两种模型CVN站基线方向定轨残差

Fig. 6 The difference of orbit determination residuals on S2 band at CVN stations base-line using ionosphere delay calculated by SHAO or CODE



图 7 X0波段两种模型CVN站基线方向定轨残差

Fig. 7 The difference of orbit determination residuals on X0 band at CVN stations base-line using ionosphere delay calculated by SHAO or CODE



图 8 X1波段两种模型CVN站基线方向定轨残差

Fig. 8 The difference of orbit determination residuals on X1 band at CVN stations base-line using ionosphere delay calculated by SHAO or CODE

定轨残差。可见,S波段的定轨残差要明显大于X波段,这是由于电离层时延与频率的平方成反比引起的。表5给出了不同波段探测器定轨残差精度差异,采用SHAO模型比CODE模型定轨残差精度在S1波段从6.1 ns提高到3.3 ns,S2波段从9.1 ns提高到7.1 ns,分别提升了约90%和20%,保证了VLBI测量精度满足指标要求。采用SHAO模型比CODE模型定轨残差精度在X0波段提高0.1 ns,X1波段精度相当。所以,在S波段观测时,基于加密GNSS网构建的全球电离层精修正模型可以有效提高VLBI技术测定轨精度。

表 5 采用两种模型分别计算不同波段的定轨残差 Table 5 The residuals of orbit determination on different bands using SHAO or CODE

				ns		
定轨残差		s4a24a				
波段频率/Hz	S12210	S22234	X08440	X18460		
SHAO	3.33	7.07	0.60	2.23		
CODE	6.07	9.10	0.70	2.23		

4 结 论

本文首先介绍了探月工程VLBI测轨分系统中介质 误差修正的几种方法,针对探月工程高精度实际需 求,基于中国区域GNSS加密网构建了全球电离层精修 正模型SHAO。该模型在iGMAS上海天文台分析中心 平台开发,结合探月工程CE4中继星任务和CE5T1任 务,比较了SHAO模型和CODE模型在不同时期电离层 时延和定轨残差方面的差异,得出以下几个结论。

1) 电离层处于活跃期时,两种模型在CVN站上的 电离层时延差异RMSE最大可达16.80 ns。相对于 CODE模型,利用CMONOC数据加密获取的电离层时 延进行VLBI定轨的残差在S1波段由6.07 ns提高到3.33 ns, 提升了约90%;在S2波段由9.10 ns提高到7.07 ns,提 升了约20%;X0波段由0.70 ns提高到0.60 ns,提升了 约14%;X1波段精度相当。所以,在S波段观测时,基 于加密GNSS网构建的全球电离层精修正模型可以有效 提高VLBI技术测定轨精度。

2) 电离层处于活跃期时,不同纬度各CVN站差异 较大。TM和KM测站电离层时延影响尤其明显,电离 层时延达到100 ns,BJ和UR测站时延相对较少,接近 60 ns。

3)电离层平静期,采用全球电离层精修正模型 SHAO与欧洲定轨中心发布的CODE模型计算的CVN站 电离层时延RMSE最大1.23 ns,时延率RMSE优于0.5 ps/s, 精度相当。不同纬度各CVN站差异较少。

致 谢

感谢CE-4中继星任务和CE-5T1任务VLBI测轨分系 统VLBI中心提供的分析数据,感谢iGMAS提供的数据

和技术支持。

参考文献

[1] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学 进展,2004,19(3):355-357.

OUYANG Z Y. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3):355-357.

- [2] BARBOSA R C. China's Chang'e -3 and Jade Rabbit Duo Land on the Moon[EB/OL]. (2020-6-15).http://NASAspaceflight.com.
- [3] 董光亮,李海涛,郝万宏,等. 中国深空测控系统建设与技术发展[J]. 深空探测学报,2018,5(2):99-114.
 DONG G L,LI H T,HAO W H, et al. Development and Future of China's Deep Space TT&C System[J]. Journal of Deep Space Exploration,2018,5(2):99-114.
- [4] 洪晓瑜,张秀忠,郑为民,等. VLBI技术在中国探月工程的应用[J].
 深空探测学报(中英文),2020,7(4):321-331.
 HONG X Y, ZHANG X Z, ZHENG W M, et al. Application of VLBI technology in China Lunar exploration project[J]. Journal of Deep

Space Exploration, 2020, 7(4): 321-331.
[5] LANYI G. Total ionospheric electron content calibration using series gps satellite data[J]. Telecommunications and Data Acquisition Report,

SEE N86-28275 19, 1986, 32: 1-12.
[6] 李子申,王宁波,李敏,等. 国际GNSS服务组织全球电离层TEC格网 精度评估与分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 3718-33729.
LI Z S, WANG N B, LI M, et al. Evaluation and analysis of the global

ionospheric TEC map in the frame of international GNSS services[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 3718-33729.

[7] 欧洲定轨中心全球电离层修正模型[DB/OL].(2020-6-15).

http://ftp.aiub.unibe.ch/.

- [8] IGS. IGS data[DB/OL].(2020-6-15).http://www.igs.org/.
- [9] CMONOC. CMONOC data[DB/OL]. (2020-6-15). http://www.neiscn. org/.
- [10] ZHOU W L, SONG S L, CHEN Q M, et al. Determination of nighttime VTEC average in the Klobuchar ionospheric delay model[J]. Geodesy and Geodynamics, 2018, 9: 175-182.
- [11] SONG S L, CHENG N, XIE H, et al. Adaptability of GPS/BDS broadcast ionospheric models to solar activities[J]. Advance in Space Research, 2019, 63: 2867-2876.
- [12] CHENG N, SONG S L, XIE H. Investigation of Solar flares impact on GPS/BDS/GALILEO broadcast ionospheric models[J]. Radio Science, 2019, 54: 91-103.
- [13] YANG Z, MORTON J Y, ZAKHARENKOVA I, et al. Global view of ionospheric disturbances impacts on kinematic GPS Positioning solutions during the 2015 St Patrick's day storm[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2020, 125(7): A02768110.1029/ 2019JA027681
- [14] 黄勇,李培佳,樊敏,等. 基于地基测量数据的地月L2点探测器轨道确定[J]. 中国科学:物理学力学天文学,2018,48(7):079501.
 HUANG Y,LI P J,FAN M, et al. Orbit determination of CE-5T1 in Earth-Moon L2 libration point orbit with ground tracking data[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2018, 48(7): 079501.

作者简介:

周伟莉(1985-),女,高级工程师,主要研究方向:GNSS高精度数据 处理及应用。

通讯地址:上海市南丹路80号中国科学院上海天文台(200030) 电话:(021)34775273

E-mail:wlzhou@shao.ac.cn

Ionospheric TEC Correction for VLBI Based on GNSS Density Network

ZHOU Weili^{1, 2, 3}, SONG Shuli¹, LI Peijia¹, ZHANG Zhibin^{1, 3}, HUANG Chao^{1, 3}, HUANG Yong^{1, 3}, WANG Guangli¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Very long baseline interferometry (VLBI) is one of the key technologies for orbit determination of Chang'-E satellites in China's lunar exploration project. Ionospheric delay is one of the main errors of VLBI orbit determination. The ionospheric delay correction method based on GNSS inversion is given, which is used in the Chinese VLBI Network. Because there are few stations of international GNSS service (IGS) in China, in order to meet the demand of lunar exploration, more stations are will be builtin China and a new global ionospheric correction model (SHAO) is constructed. Compared with the CODE model, the maximum difference of ionospheric delay Root Mean Square Error (RMSE) on CVN stations is 1.23 ns during the ionospheric quiescence. During the active period of the ionosphere, the maximum difference of the ionospheric delay RMSE on CVN station is 16.80 ns. When the ionosphere is active, the VLBI orbit determination residual based on the SHAO model increases from 6.07 ns to 3.33 ns in S1 band, 9.10 ns to 7.07 ns in S2 band, 0.70 ns to 0.60 ns in X0 band compared with CODE model.

Keywords: Lunar Exploration; VLBI; ionosphere delay; GNSS

Highlights:

• The processing strategy of GNSS nearby CVN stations is designed.

• The ionospheric delay correction method based on GNSS inversion is given, which is called SHAO model. and can be used in the VLBI orbit determination.

•When the ionosphere is in the active period, the orbit determination residual based on the SHAO model is 2~3 ns higher than that based on the CODE model in the S-band.

[责任编辑:杨晓燕,英文审校:朱恬]