

引文格式: 糜晓龙, 袁运斌, 张宝成. 多频多模 GNSS 接收机差分相位偏差的短期时变特性[J]. 测绘学报, 2021, 50(10): 1290-1297. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2021. 20200489.



MI Xiaolong, YUAN Yunbin, ZHANG Baocheng. Characteristics of the short-term temporal variations of multi-constellation and multi-frequency GNSS receiver differential phase biases [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(10): 1290-1297. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2021. 20200489.

多频多模 GNSS 接收机差分相位偏差的短期时变特性

糜晓龙^{1,2}, 袁运斌¹, 张宝成¹

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430017; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

Characteristics of the short-term temporal variations of multi-constellation and multi-frequency GNSS receiver differential phase biases

MI Xiaolong^{1,2}, YUAN Yunbin¹, ZHANG Baocheng¹

1. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430017, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: With the completion of the BeiDou-3 Navigation Satellite System (BDS-3) and the development of Galileo and quasi-zenith satellite system (QZSS), more and more satellites can be used to retrieve the atmospheric ionosphere. Generally, the short-time variation of receiver differential code biases (DCB) is considered as an important error source for ionospheric inversion using Global Navigation Satellite System (GNSS). However, some studies have shown that the short-time variation of receiver differential phase biases (DPB) may also affect the accuracy and reliability of ionospheric inversion. This paper presents a method to estimate the receiver DPB based on the single-differenced (SD) model without changing the reference satellite, which can realize the continuous estimation of the receiver DPB. DPB of the overlapping frequency combination of BDS-3, Galileo, GPS and QZSS is analyzed based on data collected from several multi-frequency and multi-constellation receivers capable of tracking the new signals of the BDS-3. The results show that ① The intraday changes of DPB of BDS-3, Galileo, GPS and QZSS are obvious and have a strong correlation with temperature. ② There is a strong correlation between the DPB of the overlapping frequency combinations of BDS-3, Galileo, GPS and QZSS. ③ There is a significant correlation between changes in DPB based on the baseline of the same type of combination.

Key words: differential code biases; differential phase biases; Global Navigation Satellite System; BeiDou navigation satellite system with global coverage; Galileo; quasi-zenith satellite system

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 42022025; 41774042); The Scientific Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (No. YJKYYQ20190063); The National Key Research Program of China (No. 2016YFB0501900)

摘要: 随着中国北斗三号全球导航卫星系统(BeiDou-3 Navigation Satellite System, BDS-3)的建成、欧盟伽利略系统(Galileo)及日本准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system, QZSS)的发展,越来越多的卫星可用于反演大气电离层。通常,接收机差分码偏差(differential code biases, DCB)的短时变化被认为是利用全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)反演电离层的重要误差来源,然而,有研究表明,接收机差分相位偏差(differential phase biases, DPB)的短时变化也有可能影响电离层反演的精度和可靠性。为此,本文提出了基于站间单差模型并采用不变换参考星策略来估计接收机 DPB 的方法,可实现接收机 DPB 的连续估计。基于几台可跟踪 BDS-3 信号的多频多模接收机采集的数据,对 BDS-3、Galileo、GPS 和 QZSS 重叠频率组合的 DPB 进行了分析。结果表明,四系统的接收机 DPB 日变化都是很明显的,并且和温度有很强的相关性;基于不同系统重叠频率组合

的 DPB 之间存在强相关;基于相同类型接收机的 DPB 的变化也存在明显的相关性。

关键词:差分码偏差;差分相位偏差;全球导航卫星系统;北斗全球导航卫星系统;伽利略系统;准天顶卫星系统

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2021)10-1290-08

基金项目:国家自然科学基金(42022025;41774042);中科院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20190063);国家重点研发计划(2016YFB0501900)

利用全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)进行电离层反演可用于解释空间大气的物理机制、改善导航定位的精度等^[1-3]。计算电离层垂直总电子含量(vertical total electron content,VTEC)是GNSS电离层研究的核心工作,而其中的接收机差分码偏差(differential code biases,DCB)及差分相位偏差(differential phase biases,DPB)是利用GNSS计算VTEC的关键制约因素^[4-6]。随着GPS和GLONASS的现代化及北斗三号全球导航卫星系统(BeiDou-3 Navigation Satellite System,BDS-3)^[7-8]、伽利略系统(Galileo)^[9-10]和准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system,QZSS)^[11-12]的发展,越来越多的卫星可用于电离层反演。为了控制接收机DCB和DPB的变化对GNSS电离层反演的影响,需要对接收机DCB和DPB的短期时变特性进行分析^[13]。

接收机DCB的估计普遍采用单差法和拟合法,但这两种方法都需要长时间的观测数据才能实现接收机DCB的估计。此外,单差法和拟合法的准确性也容易受到平滑误差和建模误差的影响,通常用于中长期的接收机DCB研究^[14-16]。目前,关于接收机DCB的短期时变特性及其对电离层反演精度和可靠性的影响已有一定文献支撑^[17-19],但接收机DPB的短时变化特性的研究还非常少。文献[20]提出了基于站间单差估计DCB的方法,该方法采用了零/短基线计算站间单差接收机DCB,可实现逐历元估计,不需要提取电离层延迟,也不需要建模,保证了接收机DCB估值的准确性。然而,该方法无法直接用于接收机DPB的短时变化分析,这是由于参考星变化会导致接收机DPB的估计不连续^[21]。为此,本文提出了基于不变换参考星的卡尔曼滤波来估计接收机DPB的站间单差方法以获取连续的接收机DPB时间序列。

本文拟通过提出的方法对BDS-3、Galileo、GPS和QZSS四系统的接收机DPB进行估计,并

探究DPB的短时变化及其规律。主要研究工作为:首先,对BDS-3、Galileo、GPS和QZSS四系统重叠频率组合的DPB进行分析,并探究四系统DPB之间的关系。然后,针对不同类型的接收机组合,探究不同的接收机组合对DPB的影响。最后,对不同频率组合的DPB进行讨论。

1 多GNSS DCB和DPB精密估计方法

本文提出了基于站间单差的多GNSS DCB和DPB精密估计的方法,可以实现DCB和DPB的联合估计。该方法采用了零/短基线,通过站间单差充分地消除电离层、对流层等系统误差,并且通过参数重整获得整周的双差模糊度,保证了DCB和DPB估计的精度和可靠性。零/短基线条件下,站间单差的模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} p_{12,j}^*(i) &= \rho_{12}^*(i) + dt_{12}(i) + d_{12,j}^*(i) + \epsilon_{12,j}^* \\ \phi_{12,j}^*(i) &= \rho_{12}^*(i) + dt_{12}(i) + \delta_{12,j}^*(i) + \\ &\quad \lambda_j z_{12,j}^* + e_{12,j}^* \end{aligned} \right\} (1)$$

式中,1和2代表了两台接收机; $(\cdot)_{12} = (\cdot)_2 - (\cdot)_1$,表示站间单差; $p_{12,j}^*(i)$ 和 $\phi_{12,j}^*(i)$ 代表星座 s^* 中的 s^* 卫星 j 频率在历元 i 的单差伪距观测值和单差相位观测值; $\rho_{12}^*(i)$ 表示卫星到接收机的距离; $dt_{12}(i)$ 是接收机钟差; λ_j 和 $z_{12,j}^*$ 分别代表波长和单差模糊度; $d_{12,j}^*(i)$ 和 $\delta_{12,j}^*(i)$ 分别为接收机伪距和相位偏差; $\epsilon_{12,j}^*$ 和 $e_{12,j}^*$ 分别代表单差观测值随机噪声和未建模的误差。

由于式(1)中接收机钟差和伪距/相位偏差线性相关,且相位偏差和模糊度线性相关导致模型存在秩亏,因此无法直接进行解算^[22-23]。消除秩亏通常是通过选取基准实现的:接收机钟差和伪距/相位偏差之间线性相关引起的秩亏是通过选取第一个频率的伪距偏差 $d_{12,1}^*(i)$ 作为基准来消除的;相位偏差和模糊度线性相关引起的秩亏是通过选取一颗参考星的单差模糊度 $\lambda_j z_{12,j}^*$ 作为基准来消除的^[24]。当秩亏被消除后,满秩的站间单差函数模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} p_{12,j}^{s*}(i) &= \rho_{12}^{s*}(i) + dt_{12}^{s*}(i) + \tilde{d}_{12,j}^{s*}(i) + \epsilon_{12,j}^{s*} \\ \phi_{12,j}^{s*}(i) &= \rho_{12}^{s*}(i) + dt_{12}^{s*}(i) + \tilde{\delta}_{12,j}^{s*}(i) + \\ &\quad \lambda_j z_{12,j}^{1*,s*} + e_{12,j}^{s*} \end{aligned} \right\} (2)$$

式中, $dt_{12}^{s*}(i) = dt_{12}^{s*}(i) + d_{12,1}^{s*}(i)$ 为参数重整后的接收机钟差; $z_{12,j}^{1*,s*} = z_{12,j}^{1*,s*} - z_{12,1}^{1*,s*}$ 为双差模糊度; $\tilde{d}_{12,j}^{s*}(i) = d_{12,j}^{s*}(i) - d_{12,1}^{s*}(i)$ 为接收机 DCB; $\tilde{\delta}_{12,j}^{s*}(i) = \delta_{12,j}^{s*}(i) - d_{12,1}^{s*}(i) + \lambda_j z_{12,j}^{1*,s*}$ 为接收机 DPB。为了使 DPB 的可估形式不受伪距偏差的影响, 第一个频率的相位偏差 $\tilde{\delta}_{12,1}^{s*}(i) = \delta_{12,1}^{s*}(i) - d_{12,1}^{s*}(i) + \lambda_1 z_{12,1}^{1*,s*}$ 被选为基准。此时, 函数模型可以表示为

$$\left. \begin{aligned} p_{12,j}^{s*}(i) &= \rho_{12}^{s*}(i) + dt_{12}^{s*}(i) + \tilde{d}_{12,j}^{s*}(i) + \epsilon_{12,j}^{s*} \\ \phi_{12,j}^{s*}(i) &= \rho_{12}^{s*}(i) + dt_{12}^{s*}(i) + \tilde{\delta}_{12,1}^{s*}(i) + \tilde{\delta}_{12,j}^{s*}(i) + \\ &\quad \lambda_j z_{12,j}^{1*,s*} + e_{12,j}^{s*} \end{aligned} \right\} (3)$$

式中, $\tilde{\delta}_{12,j}^{s*}(i) = \delta_{12,j}^{s*}(i) - \delta_{12,1}^{s*}(i) + \lambda_j z_{12,j}^{1*,s*} - \lambda_1 z_{12,1}^{1*,s*}$, 这就是 DPB 的可估形式。

由 DCB 的形式可以看出, DCB 可以逐历元估计而不会存在跳变, 而 $\lambda_j z_{12,j}^{1*,s*} - \lambda_1 z_{12,1}^{1*,s*}$ 存在于接收机 DPB 的可估形式中, 一旦参考星发生变化势必会导致 DPB 的估计不连续, 为了实现 DPB 的连续估计, 必须采用卡尔曼滤波的方式。然而, 由于同一个参考星不可能长时间存在, 当参考星不可见或出现周跳后, 不可避免地会出现 DPB 的跳变, 使 DPB 的估计不连续。但值得注意的是, 在每个卫星连续跟踪的时段内, 其单差模糊度参数是不会变化的, 在这个过程中, 单差模糊度和接收机相位偏差之间线性相关所引起的秩亏数也没有发生变化, 即该项秩亏与历元数是不相关的^[25]。在历元 i 选取的 $s^* = 1$ 单差模糊度 $\lambda_j z_{12,j}^{1*,s*}$ 作为基准, 其余卫星的单差模糊度将吸收对应的 $\lambda_j z_{12,j}^{1*,s*}$, 从而具备了 $\lambda_j z_{12,j}^{1*,s*}$ 的整周形式。因此, 只要将具备整周特性的双差模糊度 $\lambda_j z_{12,j}^{1*,s*}$ 在滤波过程预报给历元 $i+1$, 即使参考星在该历元不可见, $\lambda_j z_{12,j}^{1*,s*}$ 依然可以充当基准, 从而保证 DPB 估计的连续性。此时, 历元 $i+1$ 对应的模型可以表示为

$$\left. \begin{aligned} p_{12,j}^{s*}(i) &= \rho_{12}^{s*}(i+1) + dt_{12}^{s*}(i+1) + \tilde{d}_{12,j}^{s*}(i+1) + \\ &\quad \epsilon_{12,j}^{s*} \\ \phi_{12,j}^{s*}(i) &= \rho_{12}^{s*}(i+1) + dt_{12}^{s*}(i+1) + \tilde{\delta}_{12,1}^{s*}(i+1) + \\ &\quad \tilde{\delta}_{12,j}^{s*}(i+1) + \lambda_j z_{12,j}^{1*,s*} + e_{12,j}^{s*} \end{aligned} \right\} (4)$$

该历元 DPB 的可估形式为 $\tilde{\delta}_{12,j}^{s*}(i) = \delta_{12,j}^{s*}(i+1) - \delta_{12,1}^{s*}(i+1) + \lambda_j z_{12,j}^{1*,s*} - \lambda_1 z_{12,1}^{1*,s*}$, 其中的基准跟历元 i 相比没有发生变化, 因此, 也就不再存在 DPB 估计不连续的问题了。

2 试验分析

本试验在中国科学院精密测量科学与技术创新研究院东湖园区导航楼顶架设了 4 台接收机 IGG01、IGG02、IGG03、IGG04, 组成短基线, 于 2019 年 10 月 2 日和 2019 年 10 月 3 日 (DOY 276—DOY 277) 采集了多频多模的 GNSS 观测数据用于接收机 DPB 的分析。其中, IGG01 和 IGG02 装备的是 Trimble ALLOY 接收机, IGG03 和 IGG04 装备的是 Septentrio POLARX5 接收机, 它们都可以接收 BDS-3 新频率的信号。试验中, 参与 DPB 分析的系统和频率组合见表 1。其中, BDS-3 的 B1C 和 B2a、Galileo 的 E1 和 E5a、GPS L1 和 L5、QZSS L1 和 L5 是一组重叠的频率组合, 用来探究不同系统重叠频率 DPB 之间的关系。另一组采用了非重叠频率组合, 用来探究非重叠频率 DPB 的短期时变特性。

表 1 参与 DPB 估计及其短期时变特性分析的系统和频率组合

Tab.1 Systems and frequency combinations involved in DPB estimation and its analysis of short-time variation characteristics

系统	重叠频率组合	非重叠频率组合
BDS-3	B1C-B2a	B1C-B3I
Galileo	E1-E5a	E1-E6
GPS	L1-L5	L1-L2
QZSS	L1-L5	L1-L2

在估计站间单差 DPB 的过程中, BDS-3、Galileo、GPS 和 QZSS 系统之间采用等权处理, 天顶方向非差观测值的标准差采用经验值, 即相位标准差 $0.003 \text{ m}^{[26]}$ 。采用广播星历计算卫星位置和钟差信息, 卫星的截止高度角为 10° 。采用 LAMBDA 进行模糊度固定, ratio 检验来确定模糊度是否固定成功, 其阈值为 $2^{[27-28]}$ 。DIA (detection, identification and adaptation) 方法被用来探测和剔除粗差^[29]。

试验共分析了 3 条基线 IGG01-IGG02、IGG01-IGG04、IGG02-IGG03 之间的接收机 DPB, 它们的基线长度都是 18 m。对于每一组接收机, 分别估计四系统重叠频率及非重叠频率的

DPB。由于 Septentrio POLARX5 接收机目前只能跟踪 PRN 号小于 37 号的卫星,这些卫星都是中圆地球轨道卫星 (medium-altitude Earth orbit, MEO),因此 BDS-3 不需要区分不同的星座^[30],可以统一进行处理。

图 1 给出了 2019 年 10 月 2 日至 2019 年 10 月 3 日 (DOY 276—DOY 277) 两天 IGG02-IGG03 基线四系统 DPB 估计结果与温度的关系。其中,温度是采用分辨率为 0.1℃ 的温度计每分钟记录一次。通过对比不同系统估计结果与温度的变化关系,可以得到以下几点结论。①对于 BDS-3、Galileo、GPS 及 QZSS,其 DPB 都存在明显的日内变化(天内有 2~3 cm 的变化);②这些 DPB 的短时变化都与温度呈现明显的正相关,即 DPB 随着温度的变化而变化;③BDS-3、Galileo、GPS 及 QZSS 4 个系统采用了重叠的频率组合,它们的 DPB 变化趋势具有很好的一致性。

为了分析 DPB 与温度的相关性及不同系统重叠频率组 DPB 之间的相关性,笔者采用了皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient, PCC)。该系数常用于衡量两个变量 X 和 Y 之间的线性相关关系,其值域在 -1 与 1 之间。表 2 给出了 BDS-3、Galileo、GPS 和 QZSS 四系统重叠频率 DPB 与温度之间的皮尔逊相关系数。对于 IGG02-IGG03 基线,BDS-3、Galileo、GPS 及 QZSS 的 DPB 与温度的皮尔逊相关系数分别为 0.93、0.94、0.90 和 0.93。通常,皮尔逊相关系数超过 0.6 说明两种变量之间有强相关;而超过 0.9 的时候,说明两者之间存在极强的相关性,因此,BDS-3、Galileo、GPS 及 QZSS 的 DPB 与温度是强相关的,这意味着基于温度对 DPB 进行建模是可行的。此外,为了探究不同系统重叠频率 DPB 之间的关系,表 3 给出了基于 BDS-3 的 DPB 与其他 3 个系统 DPB 之间的皮尔逊相关系数。对于基线 IGG02-IGG03,BDS-3 和 Galileo、GPS 及 QZSS 之间的皮尔逊相关系数分别达到了 0.94、0.88 和 0.93,这说明不同系统重叠频率组之间的 DPB 的相关性也是极强的。

图 2 给出了 IGG01-IGG02 四系统重叠频率 DPB 估计的时间序列和温度的关系。此时,BDS-3、Galileo、GPS 和 QZSS 的 DPB 与温度的皮尔逊相关系数分别为 0.62、0.65、0.61 和 0.59,从统计的角度来看,基线 IGG01-IGG02 对应的 DPB 与温度也是存在强相关的。BDS-3 与 Galileo、GPS

和 QZSS 的 DPB 之间的皮尔逊相关系数分别为 0.74、0.71 和 0.74,其相关性也是显而易见的。这些结果都印证了本文的结论。IGG01-IGG02 是两台 Trimble ALLOY 接收机,可以看出,此时不论是哪个系统,DPB 虽然随着温度的变化而变化,但变化的幅度不如 IGG02-IGG03 剧烈,这说明不同类型的接收机组的 DPB 对温度的影响不同。

表 2 BDS-3、Galileo、GPS 和 QZSS 重叠频率 DPB 变化与温度变化之间的皮尔逊相关系数

Tab 2 PCCs between the DPB of BDS-3, Galileo, GPS and QZSS, and temperature

基线	BDS-3	Galileo	GPS	QZSS
IGG02-IGG03	0.93	0.94	0.90	0.93
IGG01-IGG02	0.62	0.65	0.61	0.59
IGG01-IGG04	0.92	0.91	0.91	0.94

表 3 BDS-3、Galileo、GPS 和 QZSS 重叠频率 DPB 变化之间的皮尔逊相关系数

Tab.3 PCCs between DPB changes in the overlapping frequencies of BDS-3, Galileo, GPS and QZSS

基线	BDS-3 与 Galileo	BDS-3 与 GPS	BDS-3 与 QZSS
IGG02-IGG03	0.94	0.88	0.93
IGG01-IGG02	0.74	0.71	0.74
IGG01-IGG04	0.93	0.90	0.92

图 3 给出了 IGG01-IGG04 基线的结果,在印证之前结论之外,又有了一些新的发现。此时 DPB 与温度的皮尔逊相关系数分别为 0.92、0.91、0.91 和 0.94,而 BDS-3 和其他 3 个系统 DPB 之间的皮尔逊相关系数分别为 0.93、0.90 和 0.92,这些相关性与 IGG02-IGG03 对应的结果是相当的。IGG01-IGG04 和 IGG02-IGG03 一样,是 Trimble ALLOY-Septentrio POLARX5 组成的基线,它们的变化趋势和幅度是大致相当的,这说明相同类型的接收机组的 DPB 变化与温度存在一致性。这说明按照不同类型的接收机组对 DPB 进行建模是可行的。

上述试验所得出的结论都是基于重叠频率的。为了支撑上述结论并探究非重叠频率 DPB 的短时变化与温度的关系。在这个过程中,每个系统的基准频率 (BDS-3 B1C、Galileo E1、GPS L1 和 QZSS L1) 是没有发生变化的,只是对应更改了一个频率。图 4 给出了 IGG02-IGG03 基线 BDS-3 B1C-B3I、Galileo E1-E6、GPS L1-L2 及 QZSS L1-L2 的 DPB 估计结果。由图 4 可以看

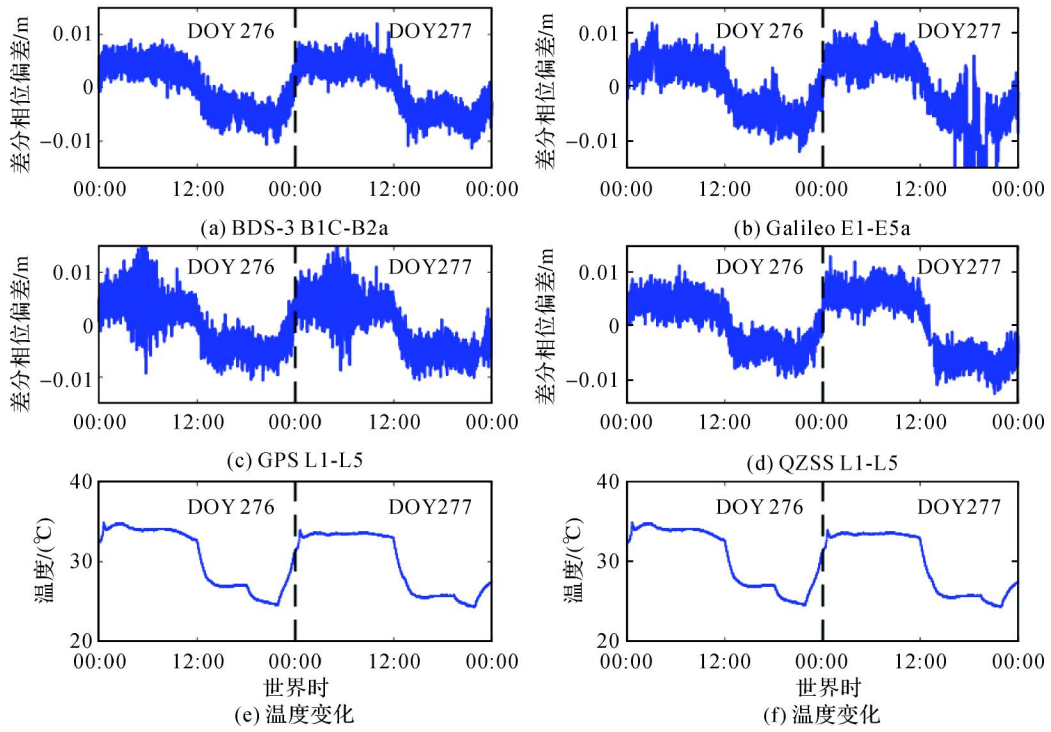


图 1 IGG02-IGG03 基线的 BDS-3 B1C-B2a, Galileo E1-E5a, GPS L1-L5 和 QZSS L1-L5 四系统重叠频率组合的接收机 DPB 估计结果与温度的变化

Fig.1 Receiver DPB estimates for BDS-3 B1C-B2a, Galileo E1-E5a, GPS L1-L5, and QZSS L1-L5 of baseline IGG02-IGG03 and temperature change

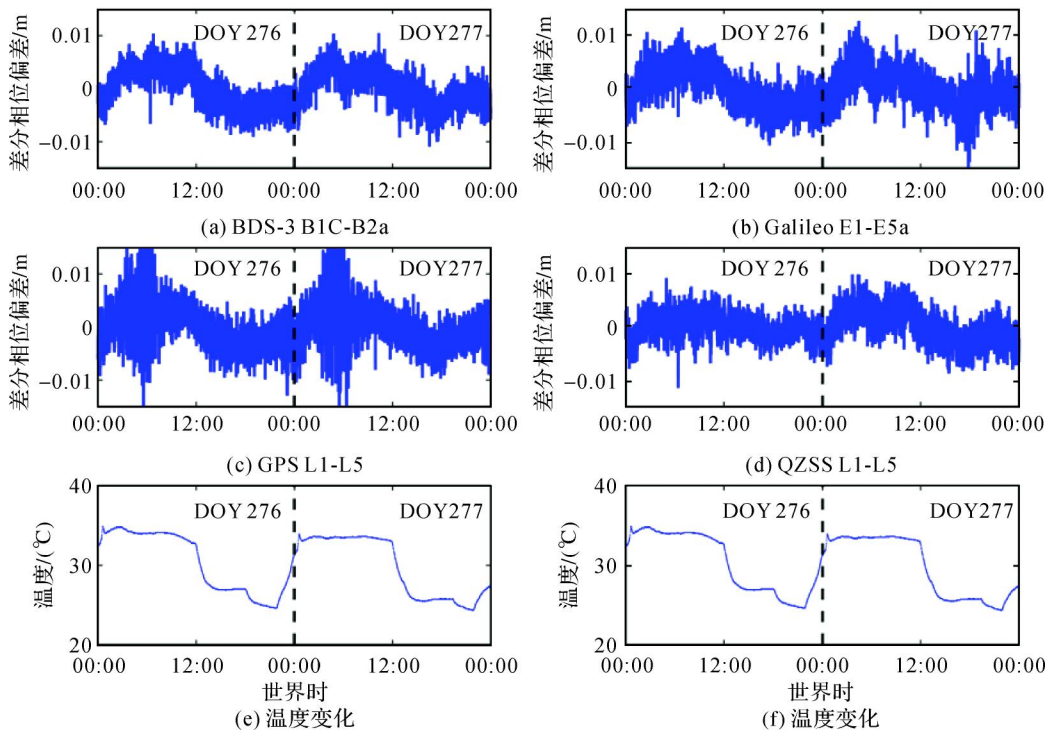


图 2 IGG01-IGG02 基线的 BDS-3 B1C-B2a, Galileo E1-E5a, GPS L1-L5 和 QZSS L1-L5 四系统重叠频率组合的接收机 DPB 估计结果与温度的变化

Fig.2 Receiver DPB estimates for BDS-3 B1C-B2a, Galileo E1-E5a, GPS L1-L5, and QZSS L1-L5 of baseline IGG01-IGG02 and temperature change

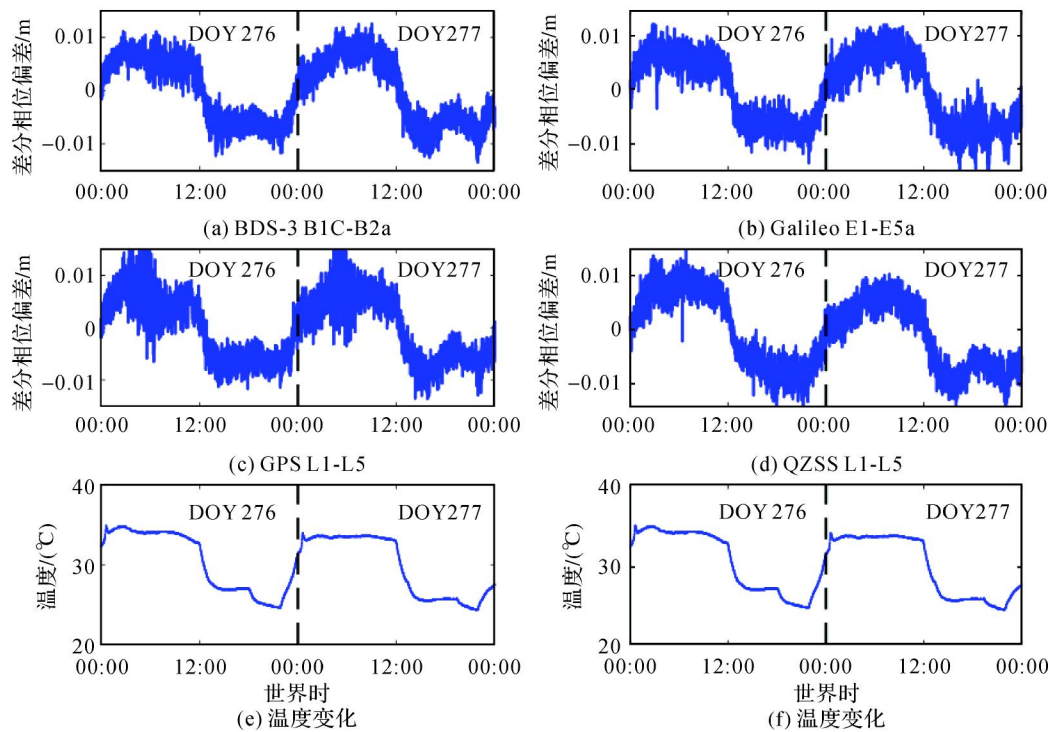


图 3 IGG01-IGG04 基线的 BDS-3 B1C-B2a, Galileo E1-E5a, GPS L1-L5 和 QZSS L1-L5 四系统重叠频率组合的接收机 DPB 估计结果与温度的变化

Fig 3 Receiver DPB estimates for BDS-3 B1C-B2a, Galileo E1-E5a, GPS L1-L5, and QZSS L1-L5 of baseline IGG01-IGG04 and temperature change

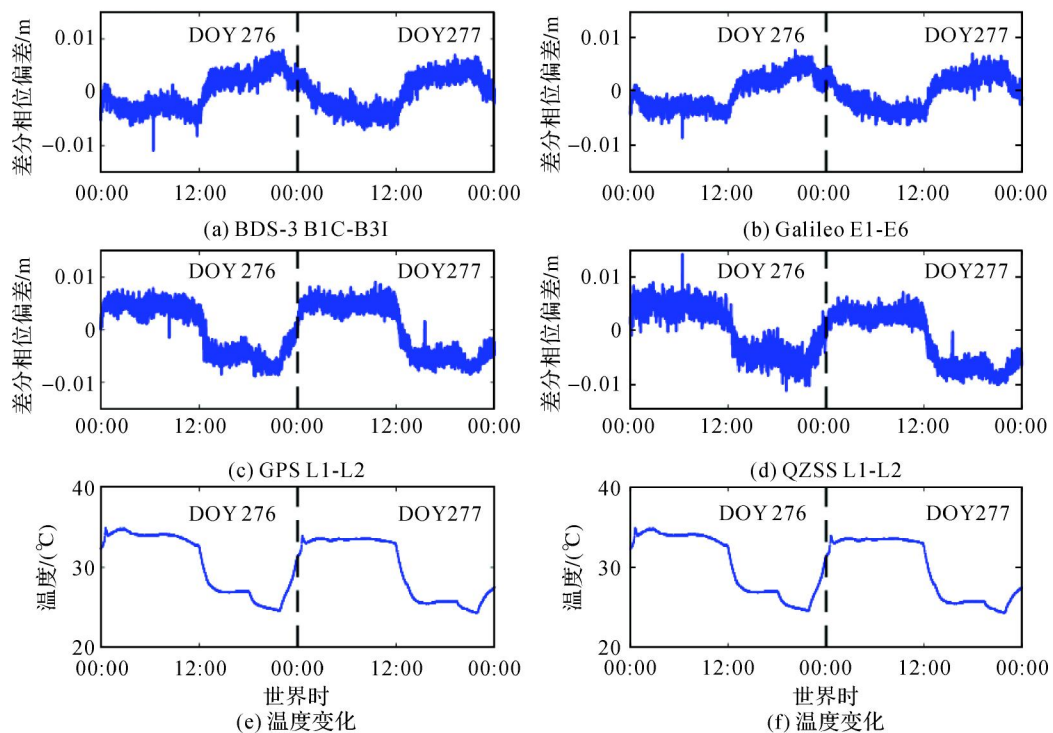


图 4 IGG02-IGG03 基线的 BDS-3 B1C-B3I, Galileo E1-E6, GPS L1-L2 和 QZSS L1-L2 四系统非重叠频率组合的接收机 DPB 估计结果与温度的变化

Fig 4 Receiver DPB estimates for BDS-3 B1C-B3I, Galileo E1-E6, GPS L1-L2, and QZSS L1-L2 of baseline IGG02-IGG03 and temperature change

出,不同系统非重叠频率组合的 DPB 对温度的响应有所不同,其中 BDS-3 和 Galileo 的 DPB 变化与温度呈现明显的负相关,而 GPS 和 QZSS 呈现明显的正相关。这从侧面说明了之前的结论只适用于重叠频率的 DPB。此外,由于采用了相同的基准频率,本文有以下几点发现:①BDS-3 B2a 和 B3I 及 Galileo E5a 和 E6 对温度的响应是不同的,并且与温度的变化关系分别呈现正负相关;②GPS 和 QZSS L1-L2 与 L1-L5 的 DPB 变化趋势是类似的,这说明 L2 和 L5 频率对温度的响应存在相似性。其他几条基线的结果与 IGG02-IGG03 的类似,在此不再赘述。这些结论同样可以说明,DPB 的短时变化是由两个频率共同决定的,而基于重叠频率组合的 DPB 之间的相关性在非重叠频率组合 DPB 中并不适用。

3 结束语

和接收机 DCB 一样,接收机 DPB 也可能是影响 GNSS 电离层反演精度和可靠性的重要因素,但以往对接收机 DPB 的研究较少。本文提出了基于站间单差模型的 DCB 和 DPB 联合估计模型,并采用了不变换参考星的策略来保证 DPB 估计的连续性。在此基础上,深入地研究了接收机 DPB 的短时变化特性及其规律。

利用布设的短基线采集数据,本文采用提出的方法进行 BDS-3、Galileo、GPS、QZSS 四系统的 DPB 估计。结果表明,接收机 DPB 存在明显的日内变化,并且与温度之间有强相关性;不同系统重叠频率组合的接收机 DPB 的变化趋势具有很好的一致性,即存在强相关;不同类型接收机组成的基线的 DPB 变化趋势存在一定的差异,而相同类型接收机的 DPB 的变化存在相似性。

本文目前利用的接收机类型有限,更严谨的结论有待利用更多接收机类型的多频多模数据进一步验证。

参考文献:

- [1] GARCIA F M, HERNANDEZ P M, JUAN M, et al. Improvement of ionospheric electron density estimation with GPSMET occultations using Abel inversion and VTEC information[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, 108(A9).
- [2] KERO A, VIERINEN J, MCKAY B D, et al. Ionospheric electron density profiles inverted from a spectral riometer measurement[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(15): 5370-5375.
- [3] YUAN Yunbin, OU Jikun. Differential areas for differential stations (DADS): a new method of establishing grid ionospheric model [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(12): 1033-1036.
- [4] JIN Rui, JIN Shuanggen, FENG Guiping. M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases[J]. *GPS solutions*, 2012, 16(4): 541-548.
- [5] ZHANG Baocheng, TEUNISSEN P J G. Characterization of multi-GNSS between-receiver differential code biases using zero and short baselines [J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(21): 1840-1849.
- [6] MONTENBRUCK O, HAUSCHILD A, STEIGENBERGER P. Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps [J]. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 2014, 61(3): 191-201.
- [7] 杨元喜,许扬胤,李金龙,等.北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析[J]. *中国科学:地球科学*, 2018, 48(5): 584-594.
YANG Yuanxi, XU Yangyin, LI Jinlong, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: data analysis based on BDS-3 demonstration system [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 48(5): 584-594.
- [8] 郭树人,蔡洪亮,孟铁男,等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. *测绘学报*, 2019, 48(7): 810-821. DOI: 10.11947/j.agcs.2019.20190091.
GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 810-821 DOI: 10.11947/j.agcs.2019.20190091.
- [9] YALVAC S, BERBER M. Galileo satellite data contribution to GNSS solutions for short and long baselines [J]. *Measurement*, 2018, 124: 173-178.
- [10] KATSIGIANNI G, PEROSANZ F, LOYER S, et al. Galileo millimeter-level kinematic precise point positioning with ambiguity resolution [J]. *Earth, Planets and Space*, 2019, 71(1): 1-6.
- [11] INABA N, NODA H, KURODA T, et al. QZSS system design and initial performance verification [C] // *Proceedings of 2011 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*. 2011: 1109-1117.
- [12] 楼益栋,郑福,龚晓鹏,等. QZSS 系统在中国区域增强服务性能评估与分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, 41(3): 298-303.
LOU Yidong, ZHENG Fu, GONG Xiaopeng, et al. Evaluation of QZSS system augmentation service performance in China region [J]. *Geomatics Information Science of Wuhan University* 2016, 41: 298-303.
- [13] GAO Zhouzheng, GE Maorong, SHEN Wenbin, et al. Ionospheric and receiver DCB-constrained multi-GNSS sin-

- gle-frequency PPP integrated with MEMS inertial measurements [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91 (11): 1351-1366.
- [14] CIRAOLLO L, AZPILICUETA F, BRUNINI C, et al. Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS [J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(2): 111-120.
- [15] LI Zishen, YUAN Yunbin, LI Hui, et al. Two-step method for the determination of the differential code biases of compass satellites [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11): 1059-076.
- [16] LI Zishen, YUAN Yunbin, FAN Lei, et al. Determination of the differential code bias for current BDS satellites [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2013, 52(7): 3968-3979.
- [17] COSTER A, WILLIAMS J, WEATHERWAX A, et al. Accuracy of GPS total electron content; GPS receiver bias temperature dependence [J]. *Radio Science*, 2013, 48(2): 190-196.
- [18] ZHA Jiuping, ZHANG Baocheng, YUAN Yunbin, et al. Use of modified carrier-to-code leveling to analyze temperature dependence of multi-GNSS receiver DCB and to retrieve ionospheric TEC [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 103.
- [19] LI Min, YUAN Yunbin, WANG Ningbo, et al. Estimation and analysis of the short-term variations of multi-GNSS receiver differential code biases using global ionosphere maps [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(8): 889-903.
- [20] 袁运斌, 张宝成, 李敏. 多频多模接收机差分码偏差的精密估计与特性分析 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(12): 2106-2111.
- YUAN Yunbin, ZHANG Baocheng, LI Min. Precise estimation and characteristic analysis of multi-GNSS receiver differential code biases [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2106-2111.
- [21] ZHANG Baocheng, TEUNISSEN P J G, YUAN Yunbin. On the short-term temporal variations of GNSS receiver differential phase biases [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(5): 563-572.
- [22] MI Xiaolong, ZHANG Baocheng, YUAN Yunbin. Multi-GNSS inter-system biases; estimability analysis and impact on RTK positioning [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 81-88.
- [23] ODOLINSKI R, TEUNISSEN P J G, ODIJK D. Combined GPS+ BDS for short to long baseline RTK positioning [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(4): 045801.
- [24] ODOLINSKI R, TEUNISSEN P J G, ODIJK D. Combined BDS, Galileo, QZSS and GPS single-frequency RTK [J]. *GPS solutions*, 2015, 19(1): 151-163.
- [25] 张宝成, 袁运斌, 蒋振伟. 一种无须变换参考星的 GNSS 单基线卡尔曼滤波算法 [J]. *测绘学报*, 2015, 44(9): 958-964.
- ZHANG Baocheng, YUAN Yunbin, JIANG Zhenwei. Kalman filter-based single-baseline GNSS data processing without pivot satellite changing [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(9): 958-964.
- [26] GAO Yangjun, LÜ Zhiwei, ZHOU Pengjin, et al. Adaptive robust filtering algorithm for BDS medium and long baseline three carrier ambiguity resolution [J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2020, 3(2): 53-61.
- [27] AMIRI-SIMKOOEI A R, JAZAERI S, ZANGENEH-NEJAD F, et al. Role of stochastic model on GPS integer ambiguity resolution success rate [J]. *GPS solutions*, 2016, 20(1): 51-61.
- [28] TEUNISSEN P J G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation [J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1-2): 65-82.
- [29] TEUNISSEN P J G. Distributional theory for the DIA method [J]. *Journal of geodesy*, 2018, 92(1): 59-80.
- [30] NADARAJAH N, TEUNISSEN P J G, SLEEWAEGEN J M, et al. The mixed-receiver BeiDou inter-satellite-type bias and its impact on RTK positioning [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3): 357-368.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2020-09-28

修回日期: 2021-08-15

第一作者简介: 糜晓龙(1996—),男,博士生,研究方向为GNSS精密定位及其应用。

First author: MI Xiaolong(1996—), male, PhD candidate, majors in GNSS precise positioning and its applications.

E-mail: xiaolong_m@asch.whigg.ac.cn

通信作者: 袁运斌

Corresponding author: YUAN Yunbin

E-mail: yybgps@whigg.ac.cn