

多模多频卫星导航系统码偏差统一定义与处理方法

李子申¹, 王宁波¹, 袁运斌²

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430074)

摘要:精确处理和修正观测量偏差(OSB)是有效发挥多模多频优势,提升GNSS服务和应用效能的前提和基础,已成为国内外卫星导航高精度定位领域研究的热点问题之一。国际GNSS服务组织(IGS)和国际大地测量协会(IAG)专门成立了工作组推动相关工作。然而,目前有关观测量偏差处理的方法仍存在着定义不统一、求解不严密、使用不便捷等突出问题,给实时高精度定位应用带来诸多不利因素。针对此,首先阐述了中国科学院(CAS)电离层分析中心码偏差产品的定义、估计策略和使用方法,然后给出了部分精度评估和分析。结果表明:CAS、CODE和DLR发布的码偏差参数一致性优于0.30ns,CAS码偏差月稳定性优于0.15ns。相关工作对于推动多模多频GNSS在电离层监测、高精度定位和授时定时等领域的应用具有重要参考价值。

关键词:码偏差;全球卫星导航系统;北斗卫星导航系统;电离层;精密定位

中图分类号:V324.2+4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:2095-8110(2020)05-0010-11



A Unified Definition and Processing Method of Observable-Specific Signal Biases for Multi-mode and Multi-frequency Global Navigation Satellite System

LI Zi-shen¹, WANG Ning-bo¹, YUAN Yun-bin²

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Accurate processing and correction of observable-specific signal bias(OSB) is the premise and foundation for effectively taking the advantages of multi-mode and multi frequency to improve the service and application efficiency of GNSS, and it has become one of the hot issues in the field of high-precision positioning of satellite navigation. The International GNSS Service(IGS) and the International Association of Geodesy(IAG) have set up working groups to facilitate the development in this field. This paper focuses on the definition, estimation strategy and application method of OSB products developed by the ionospheric analysis center of Chinese Academy of Sciences in recent years, and gives some accuracy evaluations and analysis results. The experimental results show that the consistency of OSB from CAS, Center for Orbit Determination in Europe(CODE)

收稿日期:2020-07-06;修订日期:2020-07-13

基金项目:国家自然科学基金(41674043, 41704038, 41730109);国家重点研发计划(2017YFE0131400)

作者简介:李子申(1984-),男,博士,副研究员,主要从事北斗/GNSS大气建模与应用方面的研究。

E-mail: lizishen@aircas.ac.cn

and German Aerospace Center DLR is better than 0.30ns, and the monthly stability of CAS OSB is better than 0.15ns. The related work has important reference value for promoting the application of multi-mode and multi-frequency GNSS in ionospheric monitoring, high-precision positioning and timing.

Key words: Observable-specific Signal Bias; Global Navigation Satellite System; BeiDou Navigation Satellite System; Ionosphere; Precise positioning

0 引言

随着我国北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)和欧盟 Galileo 系统的建设,多模多频卫星导航系统组合已成为应用发展的主要趋势^[1-3];特别是,近年来以高通、和芯、海思等为主的芯片厂家,陆续发布了一系列低功耗、小型化的多模多频卫星导航芯片,使得多模多频的组合应用模式走向大众领域,并逐步代替传统的单频单系统或单频双系统模式^[4]。多系统、多频点的组合应用可以大幅提高卫星导航定位的精度和鲁棒性,为通过多源融合手段解决各类复杂场景下的导航定位提供了非常有利的先决条件;精确严密的误差处理是确保多模多频组合应用效果的重要基础。

不同类型的导航信号在卫星和接收终端不同通道产生的时间延迟(也称为硬件延迟)并不完全一致,由此带来的不同导航信号观测量之间的延迟也难以做到完全一致,从而影响了定位的精度和可靠性^[5-7]。在2012年之前,上述不一致性造成的差异通常被定义为差分码偏差(Differential Code Bias, DCB);即:不同频率或类型的导航信号在发射和接收通道延迟无法做到完全一致而引起的相对偏差,分为频内偏差和频间偏差两类。其中,频内偏差表示同一频率不同类型信号观测量之间的相对偏差;频间偏差表示不同频率信号观测量之间的相对偏差^[8-10]。严格意义上讲,全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的任意两种码观测量之间均存在上述偏差,且由卫星端和接收机端两部分构成。已有研究表明,该偏差最大可达到 $\pm 20\text{ns}$ 左右,已成为各类多系统多频点数据组合应用中必须要克服的系统性误差之一^[11]。需要指出的是,在卫星导航相位观测量上,由于存在模糊度参数,上述不一致性导致的差异表现为初始相位偏差,或称之为未校正的小数偏差^[12-15],暂

不作为本文讨论的重点。

国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)于2008年成立了偏差与标定工作组(Bias and Calibration Working Group, BCWG)对此开展专门研究,分别于2012年、2015年和2019年召开了多次专题研讨会,倡议将传统的DCB拓展成为基于观测量的码偏差(Observable-specific Signal Bias, OSB)定义和表征形式,以适应多模多频 GNSS 应用发展的趋势^[7, 16-17];同时,国际大地测量协会(International Association of Geodesy, IAG)于2015年成立了以多模多频 GNSS 数据处理中的偏差(Biases in Multi-GNSS Data Processing)为主题的工作组,旨在推动该领域的学术研究和学术交流;全球连续监测评估系统(international GNSS Monitoring and Assessment System, iGMAS)也将多模多频 DCB 列为 GNSS 高精度数据处理的重要产品之一^[18]。目前,对外正式公布多模多频码偏差参数的机构主要有:欧洲定轨研究中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)、中国科学院(Chinese Academy of Sciences, CAS)和德国宇航局(German Aerospace Center, DLR)^[19-20]。

如表1所示,给出了目前频间和频内码偏差参数估计常用方法的分类,并标注了部分代表性参考文献。其中,就频内码偏差而言,通常在卫星精密钟差估计中采用MW组合估计获得或利用观测值直接计算。前者解算过程相对复杂,抗差性较好;后者实施简单,但稳定性略差。就频间码偏差而言,通常包括两种估计方法,一是与电离层总电子含量(Total Electron Content, TEC)参数同步建模估计;二是基于模型数据扣除电离层延迟后直接求解DCB参数。前者精度相对较高,但是依赖于GNSS基准站组网;后者使用灵活,但是其精度取决于模型数据的准确性。

表 1 频内和频间码偏差估计常用方法分类与特点分析

Tab. 1 The characteristics of traditional approaches for estimating the intra- and inter- frequency biases for multi-GNSS

序号	码偏差类型	估计方法简述	特点
1	频内偏差	在卫星精密钟差估计中通过 MW 组合联合计算, 进行同步估计 ^[21-22]	与卫星钟差参数估值的一致性较好
2		基于不同类型的原始伪距观测值, 直接做差并加权平均计算获得 ^[23-24]	计算便捷, 对外部数据依赖性较弱
3	频间偏差	在全球电离层 TEC 建模过程中, 进行同步估计获得 ^[25-26]	依赖于全球或区域分布的大规模基准站
4		基于逐测站电离层 TEC 建模的“两步法”解算获得 ^[9-10, 27]	对基准站数量或分布依赖较弱
5		基于经验的数据或物理模型扣除电离层延迟的解算方法 ^[28-29]	对数据或经验模型(如: GIM、IRI 等)的精度要求较高
6		基于北斗广播模型扣除电离层延迟的解算方法 ^[30]	时效性较好, 精度略差

总体来看, 不同学者提出的频间码偏差估计方法差异主要体现在如下几个方面:

1) 电离层 TEC 观测量计算方法, 主要包括: 相位平滑伪距联合无几何组合以及精密单点定位两种方法。前者估计方法简单, 不依赖外部信息, 但是受伪距噪声、多路径、平滑弧段长度等因素影响, 精度相对较低; 后者精度相对较高, 但是必须依赖于高精度的卫星轨道和钟差等外部信息, 实施中稳定性相对较差。

2) 电离层 TEC 模型化方法, 主要包括: 球谐函数、球冠谐函数、广义三角级数函数、多项式函数、层析网格等。其中, 球谐函数比较适合全球范围电离层 TEC 建模; 球冠谐函数和广义三角级数函数比较适合区域范围电离层 TEC 建模; 多项式函数比较适合小范围短时间建模; 层析网格通常是基于双层或三层假设的简化层析模型。

3) 先验电离层数据或模型: 主要包括全球电离层地图(Global Ionospheric Map, GIM)、北斗全球广播电离层模型(BeiDou Global Ionospheric delay correction Model, BDGIM)、局部常数模型等。其中, 常用的 GIM 产品主要是 IGS 电离层分析中心发布的最终产品; 相对于其他卫星导航系统的广播电离层模型, BDS 播发的 BDGIM 模型具有相对更高的精度, 也常被选作为可用的经验模型之一; 局部常数模型通常假设午夜后某一段时间内电离层延迟为常数, 并将其扣除后用于码偏差计算。

4) GNSS 基准站组网处理: 主要包括一步法和两步法两种模式。前者是将所有基准站观测数据联合, 同步解算卫星和接收机码偏差参数; 后者通常首先逐测站解算卫星和接收机码偏差之和, 然后将所有测站进行联合平差, 获得卫星和接收机的码

偏差参数; 前者实施过程中通常需要同步解算全球或区域电离层模型, 对地面基准站分布和数量要求较高; 后者仅仅需要解算单基准站电离层模型, 对地面基准站的要求相对宽松。

5) 码偏差参考基准: 主要包括重心基准和拟稳基准两类。前者将所有可视卫星的码偏差之和约束为 0; 后者通过假设检验筛选出码偏差参数变化相对稳定的部分卫星, 将其之和约束为 0。相对而言, 后者更能有效地避免因部分卫星码偏差的较大变化引起所有卫星码偏差参数解算精度下降; 而且, 二者在数学上又是可相互转换的, 但物理含义是不同的^[31]。

除了卫星码偏差之外, 接收机码偏差参数也是必须要精确估计的, 特别是针对高精度电离层监测和授时定时等应用。目前, 接收机码偏差通常是与卫星码偏差同步估计得到的, 并且假设接收机码偏差参数在 1 天内为常数。然而, 最近研究表明, 接收机码偏差变化与周围环境温度密切相关, 在温差达到 20°左右时, 接收机码偏差的变化可达到 1.0 ns 左右, 是不可忽略的^[32]。针对此, 部分学者提出了逐历元估计接收机码偏差短期变化的方法, 并分析了不同类型和不同布站条件下的接收机码偏差参数估值的短期变化规律, 对于后续提升码偏差的精细化处理水平具有重要参考价值^[33-34]。限于篇幅, 本文重点关注卫星码偏差参数。

结合 CAS 电离层分析中心近年来在多模多频码偏差参数处理方面的经验, 本文对 CAS 卫星码偏差的估计方法进行了简要介绍; 同时, 通过与 CODE 和 DLR 等机构公布的码偏差产品进行比较分析, 定量评估了 CAS 码偏差产品的精度和稳定性; 最后, 结合电离层精确监测和实时高精度定位等应用

需求,对相关工作进行总结,并给出后续工作建议。

1 码偏差统一定义与估计方法

CAS 电离层分析中心自 2012 年开始对外提供码偏差产品,历经单 GPS DCB、GPS+GLONASS DCB、GPS+GLONASS+BDS+Galileo+QZSS DCB 以及面向非组合观测量的多模多频 OSB 等 4 个阶段。下面重点对 OSB 参数的统一定义和估计方法进行介绍。

1.1 统一定义方法

CODE 最早在 1998 年给出了针对 GPS 和 GLONASS 的 P1-P2 频间偏差定义,并于 2000 年后逐步认识到 P1-C1 与 P2-C2 频内偏差的影响,给出其定义以完善 DCB 描述。iGMAS 自 2012 年立项以来,组织国内相关单位对 DCB 定义进行了多次集中研讨,并借鉴 CODE 定义 GPS 和 GLONASS DCB 的方法,对 BDS 和 Galileo 部分观测类型的频内偏差和频间偏差进行了定义,推动了多模多频 DCB 定义的拓展。Montenbruck 等基于全球多模 GNSS 试验跟踪网 (Multi-GNSS Experiment, MGEX),采用两两组合的方式系统地定义了已有的 16 种码观测量的 20 余种 DCB^[16];该定义基本涵盖了当时可能存在的所有 DCB 类型,但是,由于其采用了罗列的定义方法,使得所定义的 DCB 相互之间并不完全独立,参数估值之间也具有显著的不一致性。最新的 RINEX3.04 标准中,定义了四系统可能出现的 40 余种码观测量,如此多类型的观测量难以再采用罗列的方式对它们之间的 DCB 参数进行逐一;即使给出所有定义,其可扩展性和使用的便捷性也将大大降低;武汉大学提出了针对多模多频 GNSS 广义绝对码偏差的定义和估计方法^[35]。

针对此,借鉴 IGS 偏差与标定工作组有关建议和思路,摒弃两两组合、罗列定义的传统思路,通过甄选出部分性能稳定的频点及观测类型作为基本频点和各频点的基本观测量,采用绝对参数的形式表征 DCB 的相对特性,建立一种多模多频码偏差的统一表达和定义方法,确保 DCB 参数定义的可拓展性和使用的便捷性。

如图 1 所示,以 BDS-3 为例给出了 OSB 参数的定义方法。其中,选择 B3 频点作为基本频点,选择各频点上的数据分量观测作为基本观测类型,以绝对参数的形式表征出频内和频间码偏差参数。如此以来,各个码偏差参数之间是独立、不相关的,任意 2 个频

点或任意 2 个观测量之间的码偏差,均可通过上述定义参数的线性化组合得到;用户使用也非常方便,特别是,用户不再需要关注码偏差定义的参考基准。如表 2 所示,给出了 CAS 电离层分析中心针对 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 选定的参考频点以及各频点对应的基本观测类型。CAS 电离层分析中心针对频内和频间码偏差参数分别采用了不同的估计方法和策略;需要说明的,CAS 目前尚未计算 GLONASS 新增 G3 频点的码偏差参数。

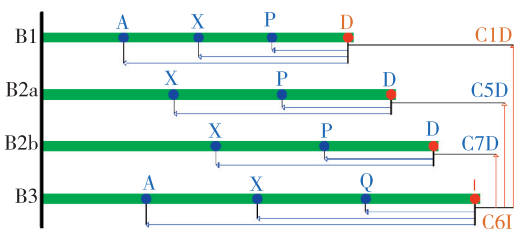


图 1 以 BDS-3 为例给出的频间(“—”)和频内(“—”)码偏差参数统一定义方法

Fig. 1 The generalization and unified definition of intra- (‘—’) and inter- (‘—’) frequency OSB proposed in this paper, taking BDS-3 as an example

表 2 CAS 电离层分析中心推荐卫星码偏差的基本频点和基本观测类型

Tab. 2 The selected reference frequencies and observation types for each system in the Ionospheric Associate Analysis Center (IAAC) of CAS

项目 系统	基本频点	基本观测类型					
GPS	L1	L1	L2	L5			
		C1W	C2W	C5Q			
BDS	B3	B3	B2a	B2b	B2	B1C	B1I
		C6I	C5D	C7D	C7I	C1D	C2I
Galileo	E1	E1	E5a	E5b	E5	E6	
		C1C	C5Q	C7Q	C8Q	C6C	
GLONASS	G1	G1	G2	G3			
		C1P	C2P	C3Q			

1.2 频内码偏差估计

频内码偏差参数估计分为两步:第一步,直接将原始观测数据中对应的频内观测量与基本观测量做差,得到逐历元卫星和接收机的频内偏差之和;然后,根据高度角进行加权平均,得到接收机相对于某卫星的频内码偏差之和的估值;第二步,将所有接收机的频内码偏差之和估值进行组网平差,施加拟稳基准约束,估计所有卫星和接收机的码偏

差参数。具体如式(1)所示

$$\begin{cases} OSB_{r_j}^{s_i} = \frac{\sum_{t=1}^{T_j^s} (\omega_t \cdot P_{r_j,xy,t}^{s_i})}{\sum_{t=1}^{T_j^s} \omega_t}, \\ \sigma_{r_j}^{s_i} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T_j^s} (P_{r_j,xy,t}^{s_i} - OSB_{r_j}^{s_i})^2}{T_j^s - 1}}, \\ \omega_t = \frac{1}{1 + \cos^2 E_{j,t}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $OSB_{r_j}^{s_i}$ 和 $\sigma_{r_j}^{s_i}$ 表示接收机 r_j 和卫星 s_i 频内码偏差参数之和的估值及其中误差; $P_{r_j,xy,t}^{s_i}$ 表示对应卫星和接收机同一频点上 x 和 y 型观测量在历元 t 时刻之差, 其中, y 为基本观测类型; T_j^s 表示 1 天内该观测类型的历元数; ω_t 表示对应历元时刻的观测量权重, 与卫星高度角 E_t 有关。

根据式(1)即可计算得到所有接收机和卫星对应的某一类型频内码偏差参数的估值及其中误差; 将所有估值看作虚拟观测量, 构造卫星和接收机频内码偏差分离的数学模型, 如式(2)所示, 利用最小二乘估计即可得到所有频内码偏差参数

$$\begin{cases} \mathbf{L}_{OSB_{xy}} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{X}_{OSB} \cdot \mathbf{D} \\ \mathbf{S} \cdot \mathbf{X}_{OSB} = 0 \\ \mathbf{X}_{OSB} = [\mathbf{OSB}_{xy}^T, \mathbf{OSB}_{r,xy}^T]^T \\ \mathbf{S} = [\mathbf{e}_{1 \times u_1}, \mathbf{0}_{1 \times u_2}], \mathbf{e}_{1 \times u_1} = [1, \dots, 1] \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{L}_{OSB_{xy}}$ 为由式(1)计算码偏差参数组成的列向量, 对应方差阵为对角阵 $\mathbf{D}$, 对角元素由 $\sigma_{r_j}^{s_i}$ 组成; $\mathbf{X}_{OSB}$ 为待估的卫星和接收机码偏差参数 $\mathbf{OSB}_{xy}^T$ 和 $\mathbf{OSB}_{r,xy}^T$, $\mathbf{B}$ 为对应的设计矩阵; $\mathbf{S} \cdot \mathbf{X}_{OSB} = 0$ 为根据拟稳思想构造的约束条件^[10], 即: 将通过拟稳检验的 u_1 颗卫星码偏差参数之和等权约束为 0。

需要说明的是, 上述估计过程中忽略了同一基准站上获得的各卫星和接收机频内码偏差参数之间的相关性; 同时, 考虑到目前 IGS 仍采用了零均值的参考基准, 估计完成后可通过 S 变换将参数估值与 IGS 现有基准进行统一。

1.3 频间码偏差估计

频间码偏差估计是在两步法的基础上^[9], 通过对其模型进行改进完善, 兼容四模三频观测数据, 实现所有卫星和所有频点频间码偏差参数的同步估计。基于三频观测数据构造的电离层观测方程如式(3)所示

$$\begin{cases} P_{j,f_1f_2}^s = A_{f_1f_2} \cdot TEC_j^s + c \cdot (OBS_{f_1}^s + OBS_{r,f_1}) + c \cdot (OBS_{f_2}^s + OBS_{r,f_2}) + \epsilon_{f_1f_2} \\ P_{j,f_1f_3}^s = A_{f_1f_3} \cdot TEC_j^s + c \cdot (OBS_{f_1}^s + OBS_{r,f_1}) + \epsilon_{f_1f_3} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $P_{j,f_1f_2}^s$ 和 $P_{j,f_1f_3}^s$ 分别表示基于频点 f_1 和 f_2 、 f_1 和 f_3 观测量计算得到的电离层观测量, f_3 为频间码偏差参数定义的基本频点(见表 2); $A_{f_1f_2}$ 和 $A_{f_1f_3}$ 表示与频率相关的电离层 TEC 和延迟之间的转换参数, TEC_j^s 为卫星视线方向上的电离层 TEC; c 为真空中的光速; $OBS_{f_1}^s$ 、 $OBS_{f_2}^s$ 、 OBS_{r,f_1} 和 OBS_{r,f_2} 为对应频点上卫星 s 和接收机 r 的码偏差参数, 基本频率上的码偏差参数为 0; $\epsilon_{f_1f_2}$ 和 $\epsilon_{f_1f_3}$ 表示对应电离层观测量的噪声。

式(3)中, 电离层观测量采用相位平滑伪距和无几何组合观测获得, 忽略高阶项影响, 频内偏差参数需要基于 1.2 节中的估计结果进行修正。电离层 TEC_j^s 仍使用两步法中提到的广义三角级数函数进行模型化^[36], 具体如式(4)所示

$$\begin{cases} TEC(\varphi, h, z) = VTEC(\varphi, h) \cdot M(z) \\ VTEC(\varphi, h) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} \{E_{nm} (\varphi - \varphi_0)^n h^m\} + \sum_{k=0}^{k_{\max}} \{C_k \cos(k \cdot h) + S_k \sin(k \cdot h)\} \\ h = \frac{2\pi(t-14)}{T} \quad (T=24h) \\ M(z) = \left[1 - \frac{\sin^2 z}{(1 + H_{\text{ion}}/R_E)^2} \right]^{-1/2} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $TEC(\varphi, h, z)$ 和 $VTEC(\varphi, h)$ 分别表示单基准上空电离层 TEC 和 VTEC 模型, 通过电离层投影函数 $M(z)$ 进行转化; φ_0 表示电离层 TEC 建模中心点的纬度; h 表示与电离层交叉点处地方时 t 相关的函数; $n_{\max}$ 、 $m_{\max}$ 与 $k_{\max}$ 分别表示多项式函数及三角级数函数的最大阶次; E_{nm} 、 C_k 、 S_k 表示待估的模型系数; 需要注意的是, 忽略了三频观测数据构造的两类电离层观测量之间的相关性。

从式(4)中可以看到, 广义三角级数通过将多项式函数与具有周期特性的三角级数函数组合, 比较适合描述具有明显周日变化特性的物理量, 能有效地实现局部电离层 TEC 变化的合理精确模拟, 并可在较长(如 1 天)的测段内描述电离层 TEC 的变化并保证其精度。广义三角级数各组成项蕴含着一定的物理含义, 代表着电离层 VTEC 的趋势变化

特性;实际应用中,可根据电离层 TEC 的变化特点,采用统计检验的方法选择适当的广义三角级数组成项,使得电离层 TEC 的拟合精度达到最优。因此,广义三角级数因其参数个数可调,且具有一定的物理含义,与分段多项式函数与低阶球谐函数相比,更适合描述单站电离层 VTEC 的变化。

基于式(3)和式(4)即可逐测站地实现频间码偏差与电离层 TEC 参数的分离,得到各卫星与接收机频间码偏差之和的估值;参照式(2)的方法,通过构造拟稳的参考基准,即可实现卫星和接收机频间码偏差的精确估计;同样地,可通过 S 变换对码偏差估值进行基准转换,实现与 IGS 产品的兼容。

1.4 特点分析

CAS 电离层分析中心在码偏差参数统一定义下,分别基于同频点不同类型的观测量以及不同频点的观测量估计得到码偏差参数,具体流程如图 2 所示。其中,首先利用原始伪距观测数据估计得到各卫星导航系统的频内码偏差参数;其次,将该参数作为先验信息,对不同的观测类型进行修正并统一到基本观测类型上;然后,构造如式(3)所示的多频电离层观测量,采用两步法和广义三角级数函数模型,逐测站同步估计局部电离层 TEC 模型和所有卫星系统的频间码偏差参数;最终,通过 S 变换,将频内和频间码偏差参数统一到目前 IGS 发布的参考基准上,形成 CAS 多频码偏差产品。

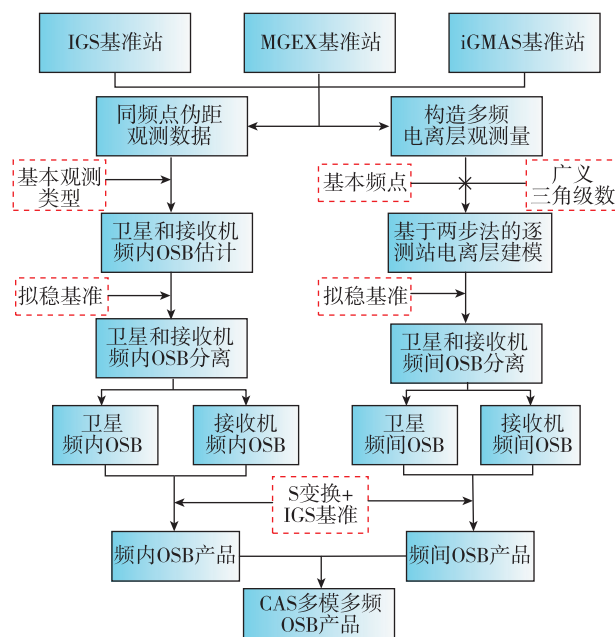


图 2 CAS 电离层分析中心码偏差处理流程示意图

Fig. 2 Flow chart of multi-GNSS OSB processing at CAS IAAC

CAS 电离层分析中心采用的估计方法,相对于 CODE 和 DLR 采用的方法,其主要特点如下:

1)摒弃了频内码偏差与卫星精密钟差联合估计的思路,直接基于原始观测值实现了码偏差参数的快速估计,不仅模型简单、外部数据依赖少,而且估计效率大幅提高,产品精度与 CODE 基本相当;在后继钟差估计中,可以直接利用该码偏差参数对频内偏差进行修正。

2)频间码偏差估计过程中,通过逐基准站构建局部电离层模型,实现了 TEC 参数与码偏差参数的分离,并通过提升单站电离层建模的精度,确保码偏差估计的精度;有效克服了传统方法中因电离层 TEC 模型化对全球或区域密集分布基准站的依赖,或者是对高精度电离层数据或经验模型的依赖,实施更加便捷。

3)卫星和接收机码偏差分离过程中,通过自适应地选择部分码偏差稳定性相对更好的卫星构造拟稳基准,可有效地避免部分稳定性较差的卫星对其他所有码偏差参数估值的影响,提高了相关参数估计的可靠性及其与实际稳定性的吻合程度。

4)基于本文给出的统一定义方法,CAS 分析中心的码偏差产品既可以作为码偏差修正数据单独使用,也可根据基本频点和基本观测类型,通过数学变换,实现与 IGS 传统 DCB 参数的兼容。

2 结果与分析

考虑到未来高精度定位和电离层精细化监测实时应用的需求,面向非组合观测量的码偏差参数(即 OSB),具有定义统一和使用便捷的优势,在 IGS 等相关组织的推荐下,将作为重要的系统误差参数为各类用户提供服务。本节重点对近 3 年来 CAS 发布的多模多频卫星码偏差产品的精度和稳定性进行分析,并给出了一些典型的试验结果。

2.1 观测数据与码偏差参数类型

CAS 电离层分析中心利用了 IGS 和 MGEX 等数据估计多模多频卫星码偏差参数。如图 3 所示,给出了参与计算的多模 GNSS 基准站分布情况,其中,不同颜色代表不同卫星导航系统。图 4 给出了 2019 年每天参与计算码偏差的基准站数量(约 300 个/天)。表 3 给出了目前估计 GPS、BDS、Galileo、GLONASS 和准天顶卫星系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)码偏差的类型。其中,BDS2 和 BDS3 由于信号体制的差异,将作为 2 个独立的卫

星导航系统进行码偏差参数估计。现有码偏差类型共计约 39 类,基本可涵盖用户使用的所有类型。需要说明的是,为了方便使用,CAS 在发布 OSB 产品时将其基准与 IGS 产品进行了统一。

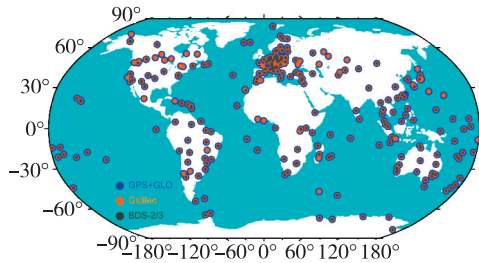


图 3 CAS 电离层分析中心计算码偏差所用
基准站分布示意图

Fig. 3 Distribution of global GNSS stations used for
the OSB estimation in CAS IAAC

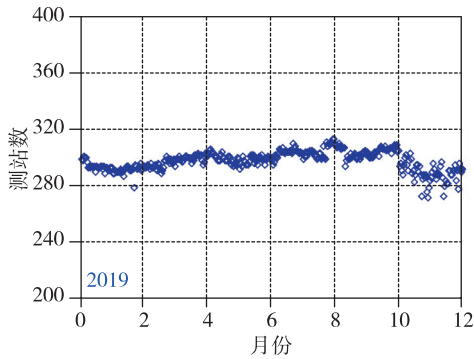


图 4 CAS 电离层分析中心 2019 年每天参与
码偏差计算的基准站数量统计

Fig. 4 Stations number used for OSB estimation
in CAS IAAC during 2019

表 3 CAS 电离层分析中心计算码偏差的主要类型统计

Tab. 3 Types of OSB estimates in CAS IAAC

序号	卫星系统	码偏差类型	数量
1	GPS	C1C、C1W	9
		C2C、C2W、C2L、C2S、C2X	
		C5Q、C5X	
2	BDS-2	C2I、C7I、C6I	3
		C1X、C1P	
3	BDS-3	C2I、C5X、C5P	8
		C6I、C7Z、C8X	
		C1C、C1X	
		C6C	
4	Galileo	C5Q、C5X	9
		C7Q、C7X	
		C8Q、C8X	
		C1C、C1P	
5	GLONASS	C2C、C2P	4
		C1C、C1X	
6	QZSS	C2L、C2X	6
		C5Q、C5X	

2.2 码偏差精度分析

通常情况下,卫星码偏差参数的稳定性相对较好,可将其在 1 个月内的平均值看作精度较好的估值供用户使用。限于篇幅,本节仅给出了 CAS 对外发布的 GPS、Galileo、BDS-2 和 BDS-3 主要频点和观测类型对应的码偏差月均值,更多产品可直接登录 <ftp.gipp.org.cn> 下载。图 5 给出了 GPS 码偏差参数的月均值,其中, GPS 码偏差参数共 9 类, L1 频点上 2 类, L2 频点上 4 类以及 L5 频点上 2 类。可以看到,近年来新发射的 Block IIF 卫星(G25 卫星之后),可支持 L5 频点新信号,新卫星不同频点上各类码偏差变化更为稳定,频内偏差数值越来越小。图 6 给出了 Galileo 码偏差参数的月均值,除 E24 卫星之外,不同频点间码偏差的变化幅度与 GPS 卫星基本相当,频内偏差相对大小与 GPS 新卫星也基本一致。需要注意的是, Galileo 系统 E24 卫星的码偏差估值相对于其他卫星出现了较大的偏差,其原因尚需要进一步分析。

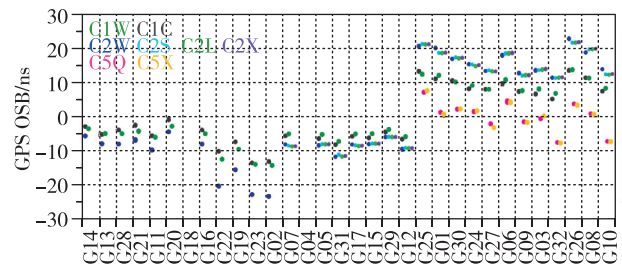


图 5 GPS 卫星不同频点和观测类型的码偏差月均值

Fig. 5 Monthly mean of OSB estimates for all frequencies
and observation types of GPS in CAS IAAC

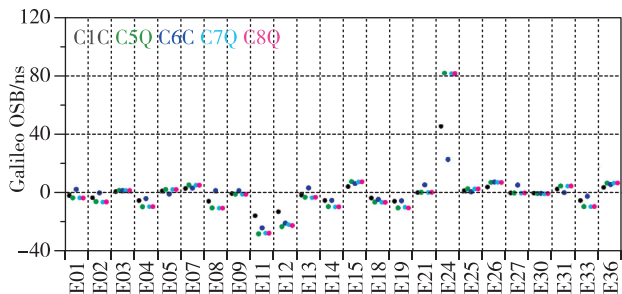


图 6 Galileo 卫星不同频点和观测类型的码偏差月均值

Fig. 6 Monthly mean of OSB estimates for all frequencies and
observation types of Galileo in CAS IAAC

图 7 和图 8 分别给出了 BDS-2 和 BDS-3 旧信号和新信号不同频点码偏差的月均值及其变化,其

中,CAS 表示该卫星由中国航天科技集团有限公司制造,SECM 表示该卫星由中国科学院微小卫星创新研究院制造。总体上看,BDS 所有卫星的码偏差变化范围相对 GPS 和 Galileo 略大,并且同一卫星不同频点之间的码偏差也相对较大,这主要与导航卫星平台以及信号发生器等相关,但是经过精确估计和修正后,对定位的影响并不十分显著。C33 卫星的码偏差相对于其他卫星略微偏大,但是,同一频点上的码偏差大小(如:B2a和B2b)仍基本一致。需要说明的是,由于2019年大部分接收机只能支持到C37卫星,仅有部分少数JAVAD接收机可接收到PRN号大于37的BDS卫星。

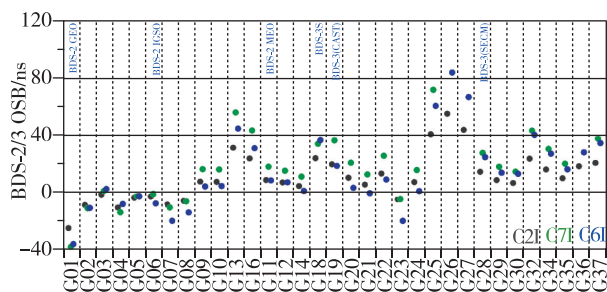


图7 BDS-2/3 旧信号不同频点码和观测类型的偏差月均值
Fig. 7 Monthly mean of OSB estimates for all frequencies and observation types of BDS-2/3 in CAS IAAC

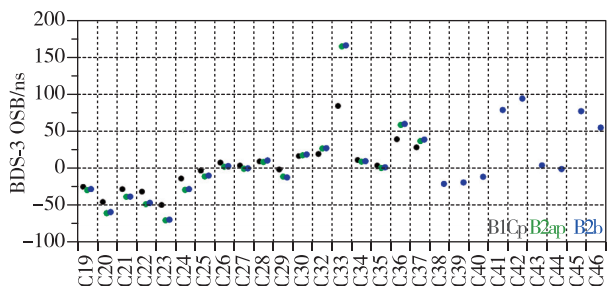


图8 BDS-3 新信号不同频点码和观测类型的偏差月均值
Fig. 8 Monthly mean of OSB estimates for all frequencies and observation types of new BDS-3 signal

以 CODE 和 DLR 发布的对应时段内的 DCB 产品为参考,经基准统一后,统计分析 CAS 发布的码偏差产品与 CODE 和 DLR 产品差异,并统计了所有卫星差异的均方根误差,其中,CODE 目前仅提供了 GPS 和 GLONASS 的码偏差产品。如图 9 所示,给出了 GPS、BDS、Galileo 和 GLONASS 的码偏差参数,并按卫星类型将 BDS-2 和 BDS-3 分别进行统计。总体上看,不同机构计算得到的 GPS、Galileo 和 BDS MEO 和 IGSO 卫星码偏差差异最

小,约 0.1ns,最大为 GLONASS 卫星,约为 0.25~0.30ns;CAS 和 DLR 发布的 BDS-GEO 卫星码偏差差异约为 0.3ns,其主要原因是 GEO 卫星相对地球基本静止,观测几何结构相对较弱;GLONASS 卫星较大的原因主要是,各机构在码偏差计算过程中针对频分多址信号的参数化策略不尽相同。

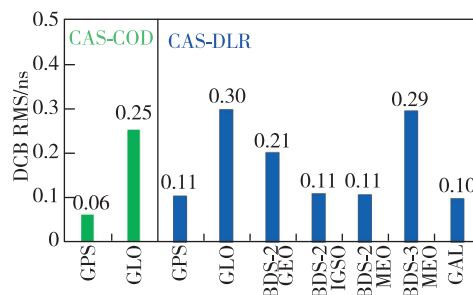


图9 CAS 发布 OSB 产品相对于 CODE 和 DLR 的均方根误差统计

Fig. 9 Root of Mean Square Error (RMSE) of OSB estimates from CAS compared with that from CODE and DLR for each system

2.3 码偏差稳定性分析

以周或月为周期,计算同一颗卫星码偏差的标准差可以反映其稳定性。如图 10 所示,给出了 BDS C01 卫星自 2017 年 1 月~2019 年 1 月估计得到的 C2I、C7I 和 C6I 码偏差月稳定性和周稳定性。总体上看,C6I 和 C7I 码偏差的月稳定性相对较差,约为 0.25ns;C2I 码偏差的月稳定性约为 0.18ns。长期来看,不同频点的码偏差稳定性基本相同,因此,可将其月均值或周均值作为一个常数进行发布使用,并定期监测其变化,适时更新即可。

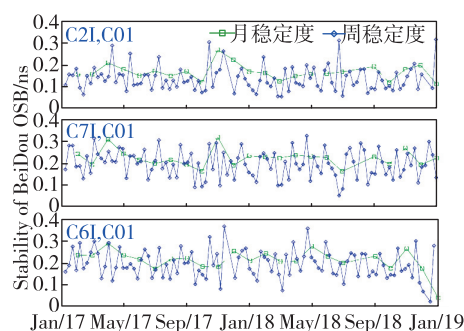


图10 CAS 发布的 BDS C01 卫星码偏差产品周和月稳定度(2017. 01-2019. 01)

Fig. 10 Monthly and weekly stabilities of OSB estimates for BDS C01 from CAS during the period from Jan. 2017 to Jan. 2019

图 11 给出了 CAS 发布的 BDS-2/3 卫星码偏差产品在 2019 年度平均的月稳定度统计值,其中,不同颜色代表不同频点码偏差,C7I 为北斗旧信号 B2I 频点上的伪距观测。从图 11 中可以看到,不同卫星的月稳定度基本在 $0.10 \sim 0.20\text{ns}$ 之内;就 BDS-2 卫星而言,B1I 观测量的码偏差相对于其他频点更加稳定。

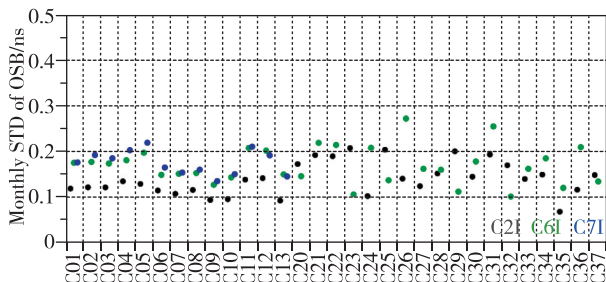


图 11 CAS 发布的 BDS-2/3 卫星码偏差产品月稳定度

Fig. 11 Monthly stability of OSB estimates for BDS-2/3 from CAS IAAC

图 12 给出了 CAS 发布的 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 卫星码偏差产品在 2017—2019 年期间的月稳定性统计值。可以看出,各卫星导航系统第一频点的码偏差参数稳定性更好,第二和第三频点码偏差的稳定性基本相当。总体上看,各卫星导航系统的码偏差稳定性均优于 0.20ns ; BDS 不同卫星类型的码偏差月稳定性差异不大;目前 BDS-3 卫星 B1 频点的码偏差稳定性略低于 BDS-2,这主要是由于跟踪 BDS-3 卫星的接收机数量要少于跟踪 BDS-2 的接收机,造成估计值稳定性下降。

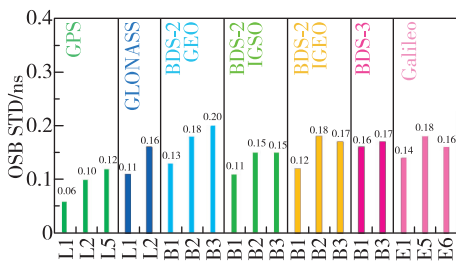


图 12 CAS 发布的多模多频卫星码偏差产品月稳定度统计值(2017—2019)

Fig. 12 Average of monthly stabilities of OSB estimates from CAS IAAC respectively for GPS, GLONASS, BDS-2, BDS-3 and Galileo during the period from 2017 to 2019

3 总结与展望

多模多频卫星导航系统码偏差参数已成为高精度数据处理和应用中亟需重点处理的系统性误差之一,精确估计和修正码偏差有利于提升卫星导航定位的精度和可靠性。近年来,随着以 BDS 为代表的全球卫星导航系统逐渐呈现出多模多频的发展趋势,码偏差参数的精确处理引起广泛关注。CAS 电离层分析中心持续关注并开展相关研究。针对传统码偏差参数处理中存在的定义不统一、估计不严密、使用不便捷等问题,提出了多模多频码偏差的统一定义和估计方法,并例行计算多模 GNSS 码偏差产品供用户使用;通过对比分析 CAS、CODE 和 DLR 等不同机构的码偏差产品,得到如下主要结论:

1) 以绝对参数的形式实现了码偏差参数的统一表征,不仅有利于开展实时编码和播发服务,而且不同频点类型用户仅需要通过线性变换,即可获得相应码偏差改正数,使用十分便捷。

2) CAS 发布的产品包括了 GPS、GLONASS、BDS-2/3、Galileo 和 QZSS 当前所有频点和所有类型的码偏差参数,可供用户免费下载使用。

3) CAS 和 CODE、DLR 码偏差产品的互差在 0.30ns 之内;总体上看,现阶段不同算法估计的码偏差参数基本一致,其精度基本在 0.20ns 左右,可支持用户实现高精度电离层监测和实时精密定位。

4) CAS 码偏差产品在不同系统或卫星的月稳定性均在 0.15ns 左右,现阶段实时播发采用逐天更新的策略是可以满足要求的。

随着高精度定位需求日益迫切,有关多模多频码偏差的研究亟需重点持续关注:1) 卫星和接收机码偏差的有效分离方法以及参考基准的构建仍需进一步完善;2) 绝对码偏差的精确标定和实时监测,这是基于卫星导航实现高精度授时和定时的必要参数之一;3) 接收机码偏差在短期内存在的不稳定变化及其精确估计和处理,这可为 PPP-RTK 中高精度电离层延迟修正奠定基础。

参考文献

- [1] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-510.

- Yang Yuanxi. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(5): 505-510(in Chinese).
- [2] 杨元喜, 陆明泉, 韩春好. GNSS 互操作若干问题[J]. *测绘学报*, 2016, 45(3): 253-259.
- Yang Yuanxi, Lu Mingquan, Han Chunhao. Some notes on interoperability of GNSS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 253-259(in Chinese).
- [3] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. *测绘学报*, 2010, 39(1): 1-6.
- Yang Yuanxi. Progress, contribution and challenges of Compass/Beidou satellite navigation system[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 1-6(in Chinese).
- [4] 汪亮, 李子申, 周凯, 等. 面向 Android 智能终端的多模 GNSS 实时非差精密定位[J]. *导航定位与授时*, 2019, 6(3): 1-10.
- Wang Liang, Li Zishen, Zhou Kai, et al. Multi-GNSS real-time un-differenced precise positioning for Android smart devices[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2019, 6(3): 1-10(in Chinese).
- [5] Coco D S, Coker C, Dahlke S R, et al. Variability of GPS satellite differential group delay biases[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(6): 931-938.
- [6] Schaer S, Dach R. Biases in GNSS analysis[C]// *Proceedings of the IGS Workshop*. Newcastle, England, 2010.
- [7] Montenbruck O, Hauschild A. Code biases in multi-GNSS point positioning[C]// *Proceedings of ION-ITM*. San Diego, California, 2013.
- [8] 李子申. GNSS/Compass 电离层时延修正及 TEC 监测理论与方法研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2012.
- Li Zishen. Study on the mitigation of ionospheric delay and the monitoring of global ionospheric TEC based on GNSS/Compass[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2012(in Chinese).
- [9] Wang N, Yuan Y, Li Z, et al. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(3): 1-20.
- [10] Li Z, Yuan Y, Li H, et al. Two-step method for the determination of the differential code biases of COMPASS satellites[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11): 1059-1076.
- [11] Sultana Q, Sunehra D, Ratnam D V, et al. Significance of instrumental biases and dilution of precision in the context of GAGAN[J]. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 2007, 36(5): 405.
- [12] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning(PPP) with daily observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7): 389-399.
- [13] Zhang B, Chen Y, Yuan Y. PPP-RTK based on un-differenced and uncombined observations: theoretical and practical aspects[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(7): 1011-1024.
- [14] Geng J, Shi C, Ge M, et al. Improving the estimation of fractional-cycle biases for ambiguity resolution in precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(8): 579-589.
- [15] Banville S, Santerre R, Cocard M, et al. Satellite and receiver phase bias calibration for undifferenced ambiguity resolution[C]// *Proceedings of ION NTM*. San Diego, California, 2008.
- [16] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps[C]// *Proceedings of ION-ITM*. San Diego, California, 2014.
- [17] Astronomical Institute U O B. International GNSS service technical report 2018[R]. IGS Central Bureau and University of Bern, Bern Open Publishing, 2019.
- [18] Han J, Zhang Q, Huang G, et al. Using IGMAS/MGEX ground tracking station data to solve the global Beidou satellite DCB products[C]// *Proceedings of Beidou Satellite System Developed by China*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [19] Li Z, Wang N, Hernández-Pajares M, et al. IGS real-time service for global ionospheric total electron content modeling[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(3): 32.
- [20] Wang N, Li Z, Montenbruck O, et al. Quality assessment of GPS, Galileo and BeiDou-2/3 satellite broadcast group delays[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 64(9): 1764-1779.
- [21] Schaer S. Differential Code Biases(DCB) in GNSS-analysis[C]// *Proceedings of IGS Workshop*. Miami Beach, Florida, USA, 2008.
- [22] Leandro R F, Langley R B, Santos M C. Estimation of P2-C2 biases by means of precise point positioning[C]// *Cambridge, Massachusetts*, 2007.
- [23] Li H, Xu T, Li B, et al. A new differential code bias (C1-P1) estimation method and its performance eval-

- uation[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 321-329.
- [24] Gao Y, Lahaye F, Héroux P, et al. Modeling and estimation of C1-P1 bias in GPS receivers[J]. *Journal of Geodesy*, 2001, 74(9): 621-626.
- [25] Schaer S. Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system [D]. Berne, Switzerland: Astronomical Institutes, University of Bern, 1999.
- [26] Ren X, Chen J, Li X, et al. Multi-GNSS contributions to differential code biases determination and regional ionospheric modeling in China[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 65(1): 221-234.
- [27] Gu S, Wang Y, Zhao Q, et al. BDS-3 differential code bias estimation with undifferenced uncombined model based on triple-frequency observation[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(4): 45.
- [28] Jiao W, Geng C, Ma Y, et al. A method to estimate DCB of COMPASS satellites based on global ionosphere map[C]// *Proceedings of China Satellite Navigation Conference(CSNC)*. Guangzhou, China, 2012.
- [29] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J. New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1999, 61(16): 1237-1247.
- [30] Zhu Y, Tan S, Feng L, et al. Estimation of the DCB for the BDS-3 new signals based on BDGIM constraints[J]. *Advances in Space Research*, 2020.
- [31] 欧吉坤. 测量平差中不适定问题解的统一表达与选权拟合法[J]. *测绘学报*, 2004, 33(4): 283-288.
- Ou Jikun. Uniform expression of solutions of ill-posed problems in surveying adjustment and the fitting method by selection of the parameter weights [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(4): 283-288(in Chinese).
- [32] Liu A, Li Z, Wang N, et al. Analysis of the short-term temporal variation of differential code bias in GNSS receiver [J]. *Measurement*, 2019, 153: 107448.
- [33] Zhang B, Teunissen P J G, Yuan Y, et al. Joint estimation of vertical total electron content(VTEC) and satellite differential code biases(SDCBs) using low-cost receivers[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(4): 401-413.
- [34] Zhang B, Teunissen P J G, Yuan Y, et al. A modified carrier-to-code leveling method for retrieving ionospheric observables and detecting short-term temporal variability of receiver differential code biases[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(1): 19-28.
- [35] 张小红, 郭斐, 任晓东. 一种多频多模 GNSS 广义绝对码偏差估计方法[P]. CN201711127678.6. 2019-09-10.
- Zhang Xiaohong, Guo Fei, Ren Xiaodong. A method for estimating the generalized absolute code biases for multi-GNSS[P]. CN201711127678.6. 2019-09-10(in Chinese).
- [36] Yuan Y, Ou J. A generalized trigonometric series function model for determining ionospheric delay[J]. *Progress In Natural Science*, 2004, 14(11): 1010-1014.