

硕士学位论文

GNSS 差分码偏差估计和时变特性研究

作者姓名:	崔洁
指导教师:	陈俊平 研究员 中国科学院上海天文台
	王彬 副研究员 中国科学院上海天文台
学位类别:	理学硕士
学科专业:	天体测量与天体力学
培养单位:	中国科学院上海天文台

2022年6月

Study on estimation and time-varying characteristics of

GNSS differential code biases

A thesis submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Master of Natural Science

in Astrometry and Celestial Mechanics

By

Cui Jie

Supervisor: Professor Chen Junping Professor Wang Bin

Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences

June 2022

中国科学院大学

研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明:所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作 所取得的成果。尽我所知,除文中已经注明引用的内容外,本论文不包含任何其 他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献 的其他个人和集体,均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名: 崔洁

日 期: 2022.05.21

中国科学院大学

学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定,即中 国科学院有权保留送交学位论文的副本,允许该论文被查阅,可以按照学术研究 公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容,可以采用影印、 缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者名	签名: 才	主洁	导	师签	名:	腔厚草
日	期:2	022.05.21	日		期 :	2022.05.21

摘要

GNSS 数据处理中,时空信息的生成及其传递是由码伪距和载波相位组合观测值实现的。不同分析中心采用不同数据处理算法生成的精密产品参考于某一组合观测值,包含特定观测值偏差。差分码偏差(Differential Code Bias, DCB)在GNSS 时空信息的生成及其传递过程中具有关键作用,GNSS 差分码偏差估计和时变特性研究对于提升 GNSS 时空信息传递精度具有重要意义。

对于 DCB 的研究,可以分为两个方面,一是利用地面监测站数据进行电离 层建模和分析时,需要进行卫星和接收机 DCB 的校正;二是精密定位和授时情 况下,需要用到卫星和接收机 DCB,实现时空基准的统一。随着低轨星座的快 速部署以及低轨增强 GNSS (LeGNSS)的快速发展,利用低轨数据开展电离层 分析研究已经成为研究热点,而针对北斗系统不能全球布站的局限,研究如何利 用低轨星座实现北斗系统的增强同样是一个值得思考的问题。此外,弹性功率 (Flex Power)是 GPS 现代化 Block IIR、Block IIF 卫星实施的应对干扰的有效 措施,弹性功率不仅会影响接收机的载噪比(C/N₀)观测数据,还会对卫星端 DCB 产生影响,通常的天均值 DCB 解算策略不适用于弹性功率期间的卫星端 DCB 估 计,从而影响精密定位精度。

基于上述研究背景,本课题针对使用低轨观测数据解算北斗卫星 DCB、DCB 参数现有产品的稳定性和长期时变特性以及弹性功率期间北斗卫星 DCB 变化三 个问题开展分析研究。首先概述了 DCB 的研究背景和国内外研究现状; 然后介 绍了 GNSS DCB 的解算原理与方法,介绍了中国科学院(Chinese Academy of Sciences, CAS)和德国宇航中心(German Aerospace Center, DLR)解算频间偏 差的方法;接着基于天绘(TH)低轨卫星观测数据开展了北斗卫星 DCB 参数估 计,分析了低轨卫星在增强北斗系统 DCB 解算中的作用。阐述了卫星 DCB 稳定 度的评估方法,评估了 GPS 卫星 DCB 和北斗卫星 DCB; 然后提取了 GPS 卫星 DCB 的周期特征,对比了频内偏差和频间偏差的明显周期项;最后分析了弹性 功率期间北斗卫星 DCB 的变化。

研究结果表明,基于低轨卫星观测数据解算 DCB 参数的精度与基于单个地

I

面监测站观测数据解算 DCB 参数的精度相当,利用低轨卫星+少量地面监测站 可达到与全球监测布站相同的 DCB 解算效果; CAS 和 DLR 两家分析中心发布 的 GPS 卫星 DCB 产品和北斗卫星 DCB 产品的稳定度均在 0.3ns 以内,部分 GPS 卫星 DCB 存在半年或年周期项;北斗星座 IGSO 卫星在 2021 年 029-031 天进行 了 B3I 频点的功率增强,使得 C6I-C2I 差分码偏差增大了 9-14ns。 关键词: GNSS,差分码偏差,稳定度,时变特性,弹性功率

Abstract

The generation and transmission of spatiotemporal information in GNSS data processing is realized by the combined observations of code pseudo-range and carrier phase. The precise products generated by different analysis centers with different data processing algorithms is referred to a certain combination of observations, involving the bias of specific observations. Differential code bias (DCB) plays a key role in the generation and transmission of GNSS spatiotemporal information. The estimation of GNSS DCB and the study of time-varying characteristics are of great significance for improving the accuracy of GNSS spatiotemporal information transmission.

For the research of DCB, it can be divided into two aspects. Firstly, satellite and receiver DCB corrections are required, when using the data of monitoring station for ionospheric modeling and analysis; secondly, it is necessary to apply Satellite and receiver DCB corrections for precise positioning and timing to realize the consistency of space-time reference. With the rapid deployment of low-orbit constellations and the rapid development of low-orbit enhanced GNSS (LeGNSS), the application of low-orbit observations to perform ionospheric analysis has become a research focus. The enhancement of Beidou satellite system by LEO constellation is also a question worthy of consideration. Besides, flexible power is an effective method implemented by GPS modernized Block IIR and Block IIF satellites to deal with the interference. The flexible power will not only affect the receiver's carrier-to-noise ratio (C/N₀) data, but also affect the satellite DCB. The usual day-average DCB solution strategy is not suitable for satellite DCB estimation during flex power period, thus affecting the precision of precise positioning.

This subject performs analysis and research on three issues: the application of loworbit observations to solve the Beidou satellite DCB, the stability and long-term timevarying characteristics of the existing products of DCB parameters, and the Beidou satellite DCB variation during flex power. Firstly, the background of DCB research and the status at home and abroad are summarized; then the principle and method of GNSS DCB calculation are introduced, and the DCB estimation provided by Chinese Academy of Sciences (CAS) and German Aerospace Center (DLR) is introduced. Then, with the observations of Tianhui satellites, the DCB of Beidou satellites are estimated, and the role of low-earth-orbit satellites in enhancing the DCB calculation of Beidou satellite system is analyzed. The evaluation method of satellite DCB stability is introduced, and the DCB of GPS and BDS satellites are evaluated; then the periodic characteristics of GPS satellite DCB are extracted, and the obvious periodic terms of intra-frequency and inter-frequency biases are compared; finally, the variation of Beidou satellite DCB during the flex power period is analyzed.

Research results show that the accuracy of Beidou satellite DCB estimations based on the observations of one low-earth-orbit satellite is almost the same as that of DCB estimations based on the observations of one single monitoring station. Using lowearth-orbit satellites and a small number of monitoring stations can achieve the same accuracy as that of the global monitoring stations. The stability of GPS and BDS satellite DCB provided by CAS and DLR are both within 0.3ns, and some GPS satellites have half-year or annual periodic characteristic; the flex power of B3I frequency for BDS IGSO satellites during the 029 to 031 in 2021 results in an increased C6I-C2I DCB by 9-14ns.

Key Words: GNSS, DCB, Stability, Time-Varying Characteristics, Flex Power

Ħ	크
	× K

摘	要	•••••		I
Abs	strac	:t		II
目	录			IV
第-	-章	绪记	仑	1
	1.1	课题	研究背景	1
	1.2	国内:	外研究现状	3
		1.2.1	DCB 产品的发布机构	3
		1.2.2	DCB 稳定度研究现状	6
		1.2.3	DCB 时变特性研究现状	7
		1.2.4	DCB 与弹性功率研究现状	7
	1.3	主要	工作及内容安排	8
第二	_章	GN	SS 差分码偏差解算的相关原理与方法	10
	2.1	引言		10
	2.2	GNS	S 观测方程和常用的线性组合	10
		2.2.1	GNSS 观测方程	10
		2.2.2	常用的线性组合	12
	2.3	GNS	S 电离层观测量和电离层 TEC 提取方法	14
		2.3.1	GNSS 电离层时间延迟	14
		2.3.2	GNSS 电离层观测量提取方法	15
	2.4	频内	偏差解算方法	16
		2.4.1	频内偏差参数定义	16
		2.4.2	码观测量直接组合计算频内偏差参数	17
	2.5	频间	偏差解算方法	
		2.5.1	频间偏差参数定义	
		2.5.2	频间偏差估计方法	18

	2.5.3 DLR 估计频间偏差的方法	19
	2.5.4 CAS 估计频间偏差的方法	20
2.6	本章小结	21
第三章	基于 TH 卫星观测数据的 DCB 产品解算	22
3.1	引言	22
3.2	DCB 产品基准统一方法	22
3.3	GPS 和 BDS-2 单天 DCB 结果	23
3.4	GPS 和 BDS-2 7 天 DCB 结果	27
3.5	本章小结	35
第四章	卫星差分码偏差产品的稳定度分析	36
4.1	引言	
4.2	产品稳定度评估方法	
	4.2.1 产品月稳定度	
	4.2.2 产品平均月稳定度	
4.3	GPS 卫星频内偏差稳定度	37
4.4	GPS 卫星和 BDS 卫星频间偏差稳定度	
4.5	本章小结	41
第五章	卫星差分码偏差的长期时变特性分析	42
5.1	引言	42
5.2	卫星频间偏差的长期时变特性分析	42
5.3	卫星频间偏差的周期特性分析	45
5.4	卫星频内偏差和频间偏差的周期特性对比	46
5.5	本章小结	48
第六章	弹性功率对差分码偏差的影响分析	49
6.1	引言	49
6.2	载噪比和信噪比	49
6.3	BDS 卫星 C/N ₀ 时间序列分析	50
6.4	BDS 卫星 DCB 短时时变分析	54

6.5	本章小结	57
第七章	总结与展望	59
参考文南	<i>κ</i> α	51
致 谢		54
作者简历	5及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果6	56
作者简历	5: 6	66
已发表	(或正式接受)的学术论文:	66

图目录

图 1.1	码偏差的简易示意图2
图 2.1	GPS 卫星频内偏差的简易示意图16
图 2.2	GPS 卫星频间偏差的简易示意图18
图 3.1	基于不同数据的 GPS C1C-C2W 频间偏差解算结果
图 3.2	基于不同数据的 BDS-2 C2I-C6I 频间偏差解算结果
图 3.3	GPS C1C-C2W 频间偏差 7 天单天解 STD32
图 3.4	BDS-2 C2I-C6I 频间偏差 7 天单天解 STD35
图 4.1	CAS 及 DLR 确定的 2021 年 GPS 卫星频内偏差的平均月稳定度37
图 4.2	CAS 及 DLR 确定的 2021 年 GPS 卫星频间偏差的平均月稳定度38
图 4.3	CAS 及 DLR 确定的 2021 年 BDS 卫星频间偏差的平均月稳定度39
图 4.4	BDS-2 卫星 DCB 时间序列图40
图 5.1	GPS 卫星未统一基准的 C1C-C2W 频间偏差时间序列图(CAS)43
图 5.2	GPS 卫星未统一基准的 C1C-C2W 频间偏差时间序列图(DLR)43
图 5.3	GPS 卫星统一基准后的 C1C-C2W 频间偏差时间序列图(CAS)44
图 5.4	GPS 卫星统一基准后的 C1C-C2W 频间偏差时间序列图(DLR)44
图 5.5	G043(G13)卫星 DCB 周期特征分析结果(CAS)45
图 5.6	G043(G13)卫星 DCB 周期特征分析结果(DLR)45
图 5.7	GPS 卫星频内偏差和频间偏差周期对比(CAS)47
图 5.8	GPS 卫星频内偏差和频间偏差周期对比(DLR)47
图 6.1	JFNG 站 BDS IGSO 卫星 B1I、B2I 以及 B3I 信号 C/N₀时间序列图51
图 6.2	WUH2 站 BDS IGSO 试验星 B1I、B2I 以及 B3I 信号 C/N ₀ 时间序列图52
图 6.3	JFNG 站 BDS GEO 卫星 B1I、B2I 以及 B3I 信号 C/N ₀ 时间序列图53
图 6.4	JFNG 站 BDS MEO 卫星 B1I、B2I 以及 B3I 信号 C/N ₀ 时间序列图54
图 6.5	实验使用的 IGS 监测站分布图55
图 6.6	2021 年 027-031 天 BDS 卫星 C6I-C2I 频间偏差估值
图 6.7	2021 年 027-031 天 BDS 卫星 C6I-C2I 频间偏差估值
图 6.8 序列	2021 年 029 天全球监测站 BDS-2 星座 IGSO 卫星 C6I-C2I 频间偏差估值

表目录

表 1.1	四大全球卫星导航系统	1
表 1.2	不同机构的 GNSS DCB 产品类型及估计方法	5
表 1.3	CAS 和 DLR 的 GNSS 差分码偏差产品处理方法	6
表 3.1	TH-2 卫星观测数据类型信息	22
表 3.2	2021 年 084 天 GPS C1C-C2W 频间偏差单天解	24
表 3.3	2021 年 084 天 BDS-2 C2I-C6I 频间偏差单天解	26
表 3.4	2021 年 084-090 天 GPS C1C-C2W 频间偏差解算结果	28
表 3.5	2021 年 084-090 天 BDS-2 C2I-C6I 频间偏差解算结果	32
表 4.1	CAS 及 DLR 确定的 2021 年 GPS 卫星频内偏差的稳定度	38
表 4.2	不同类型 DCB 2021 年平均月稳定度统计	40
表 5.1	CAS 及 DLR GPS 卫星 DCB 周期统计	46
表 6.1	2021 年 027-031 天 IGSO 卫星 C/N ₀ 变化起止时刻表	52
表 6.2	2021 年 027-031 天 IGSO 卫星 C6I-C2I 频间偏差阶跃估值	55
表 6.3 情况	短时 DCB 估计的 2021 年 027-031 天 IGSO 卫星 C6I-C2I 频间偏差路	兆变 57

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

当前,美国 GPS (Global Positioning System)和俄罗斯 GLONASS (Global Navigation Satellite System)正在实施现代化,中国 BDS (BeiDou Satellite Navigation System)、欧盟 Galileo (Galileo Satellite Navigation System)已经完成 全球星座的部署。全球卫星导航系统的建设与发展,为GNSS 用户获取连续、稳定、可靠的导航定位及授时服务提供了有力的支撑。

下表统计了四大全球卫星导航系统的情况。其中 GPS 卫星星座状态来自 GPS 官网(https://www.gps.gov/systems/gps/space/),发布时间是 2022 年 02 月 02 日; GLONASS 和 BDS 卫星星座状态来自中国卫星导航系统管理办公室测试评估研 究中心官网(http://csno-tarc.cn/system/constellation),发布时间分别是 2021 年 08 月 17 日和 2022 年 03 月 31 日; Galileo 卫星星座状态来自欧洲 GNSS 服务中心 (https://www.gsc-europa.eu/),数据时间是 2022 年 03 月 31 日。

卫星系统	卫星类型	信号类型	可用卫星数量
	Block IIR	L1 C/A,L1/L2,P(Y)	7
CDS	Block IIR-M	L1 C/A,L1/L2,P(Y),L2C,L1/L2M	7
OFS	Block IIF	L1 C/A,L1/L2,P(Y),L2C,L1/L2M,L5	12
	Block III/IIIF	L1 C/A,L1/L2,P(Y),L2C,L1/L2M,L5,L1C	4
	М	L1/L2,C/A&P	22
GLONASS	K	L1/L2,C/A&P,L3	1
Calilao	IOV	E1,E6,E5a/b/ab	3
Galileo	FOC	E1,E6,E5a/b/ab	19
BDS	BDS-2	B1,B2,B3	15
	BDS-3	B1,B3,B1C,B2a/b/ab	30

表 1.1 四大全球卫星导航系统

由表可知,不同类型的卫星有着不完全相同的信号类型,不同类型的测码信号在卫星和接收机不同通道产生的时间延迟(或称硬件延迟)并不完全一致,由此产生的两类测码信号之间的时延差异称为差分码偏差(Differential Code Bias, DCB)。简易示意如下图所示。



图 1.1 码偏差的简易示意图

DCB 可以细分为频内偏差(Intra-Frequency Bias)和频间偏差(Inter-Frequency Bias),是使用 GNSS 观测数据进行电离层精确提取时必须要改正的硬件时延偏差,是精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)中的系统性误差,是反映 GNSS 卫星与接收机硬件性能的重要指标。研究表明,当使用 GPS 观测数据来解算电 离层 TEC (Total Electron Content)时,忽略卫星或接收机的 DCB 将导致±9或 ±30 TECU (Total Electron Content Unit)的误差^[1];在使用 BDS 观测数据进行解 算时, DCB 的修正能够提高 PPP 收敛性能^[2]。

在使用 GNSS 数据时,可以采用已有产品来消除 DCB 的影响。IGS (International GNSS Services)自 2011 年开始着手建立和发展多模 GNSS 实验 跟踪网(Multi-GNSS Experiment, MGEX),全球多模 GNSS 监测站为 GNSS 研究与应用提供了非常重要的观测数据。基于全球监测站数据,国内外有多家分析中心向 IGS 提交 DCB 产品,供 GNSS 用户使用。

除地面监测站外,低轨卫星的 GNSS 观测数据,同样可以助力 GNSS 数据分析。近年来,低轨卫星系统的建设和发展如火如荼,如美国的 SpaceX,瑞士的 Astrocast,中国的天绘(TH)等。低轨卫星导航系统有望实现信号强度提升和精度提高,形成对中高轨 GNSS 星座的增强、补充以及备份,同时具备独立提供导航服务的潜力^[3]。

弹性功率(Flex Power)也是能够对 GNSS 系统进行增强的有效方法,在信号之间重新分配传输功率,有利于解决 GNSS 信号能量较弱、穿透力差和易被干

扰等问题,用于对抗干扰^[4]。但弹性功率会改变 GNSS 信号的载噪比(Carrier-to-Noise Ratio, CNR,又称 C/N₀),并影响 DCB 的估计结果,造成 DCB 时间序列 的短时变化。因此在分析 DCB 的时变特性时,需要关注弹性功率的影响。

卫星导航系统的建设和发展,让 GNSS 观测资料变得更加丰富的同时,也带 来了全新的机遇与挑战。新增、更替、现代化的卫星,更多的信号类型以及越来 越复杂的星座构成,使得 DCB 的类型也随之增加。此外,车道级导航、自动驾 驶等领域对定位精度需求的不断提升,要求误差修正更加精确。DCB 是 GNSS 数据分析中一类非常重要的误差,对其解算方法的总结、产品稳定度的评估和时 变特性的研究非常必要。

基于以上研究背景和意义,本课题开展基于低轨卫星观测数据的 GNSS DCB 解算,分析低轨卫星在增强 GNSS DCB 解算中的作用,评估现有 DCB 产品的稳 定度,基于长期的 DCB 时间序列开展时变特性分析,分析弹性功率对北斗 DCB 的影响。

1.2 国内外研究现状

GNSS 数据处理中,时空信息的生成及其传递是由码伪距和载波相位组合观测值实现的。不同分析中心采用不同数据处理算法生成的精密钟差产品参考于某一组合观测值,包含特定观测值偏差(Observable Specific Bias,OSB)。OSB可分为码伪距OSB和相位OSB,相位OSB通常用于PPPAR(Precise Point Positioning Ambiguity Resolution),表现为宽巷 UPD(Uncalibrated Phase Delay)和窄巷 UPD。 伪距OSB与DCB、时间群延迟(Timing Group Delay,TGD)具有相互转换关系,并且会影响UPD的估计。伪距OSB通常在DCB估计的基础上添加无电离层钟差基准约束进行求解,因此DCB在GNSS时空信息的生成及其传递过程中具有关键作用。此外,差分码偏差是GNSS数据用于电离层TEC精确估计和提取时,必须要校正的硬件时延偏差。因此,DCB的分析研究对于电离层分析以及高精度导航定位是非常重要和必要的。

1.2.1 DCB 产品的发布机构

自 2000 年, IGS 开始着手分析 GPS 卫星 P1-C1 频内偏差的长期变化特征,

发布了 cc2nocc 软件,并给出 GPS 卫星 P1-C1 频内偏差的经验改正值^[5]。用户基于该经验改正值,可以直接将 GPS 观测量中的 C1 码修正为 P1 码来进行定位。

同在 2000 年, CODE(Center for Orbit Determination in Europe)开始向全球 导航定位用户发布 GPS 卫星 P1-C1 频内偏差参数的月均值产品,该产品的解算 方法是在钟差参数估计的同时处理获得 GPS 卫星 P1-C1 频内偏差。自 2010 年开 始,CODE 开始提供 GPS 和 GLONASS 卫星及接收机频内偏差的产品,该产品 的解算方法是通过直接采用码观测量的电离层残差组合计算获得^[6]。

2015年11月召开的 IGS 偏差工作组(IGS Bias Workshop)会议上,偏差和 校准工作组(Bias and Calibration Working Group, BCWG)建议 GPS 用户不再使用 cc2nocc 软件提供的经验改正值,而是直接采用 P1-C1 偏差产品进行频内偏差 改正。

频间偏差产品则是由 IGS 各电离层分析中心,采用全球电离层 TEC 建模的 方式,同步解算获得卫星和接收机相应的产品^[7]。采用区域电离层 TEC 建模,也 同样可以估计获得卫星频间偏差参数和接收机频间偏差参数,但是受到区域网观 测条件的限制,采用区域电离层 TEC 建模计算获得的只是部分卫星的频间偏差 参数,可能无法覆盖所有的卫星^[8]。

随着 GPS 和 GLONASS 的现代化以及 BDS 和 Galileo 全球卫星导航系统的 建设与完善,多系统 DCB 参数的解算要求不容忽视。IGS 建立和发展的 MGEX 实验网,有着丰富的多频多模 GNSS 观测数据,为 DCB 产品的精确解算提供了 多系统的数据源。基于 IGS 和 MGEX 的观测数据,目前主要有中国科学院 (Chinese Academy of Sciences, CAS)和德国宇航中心(German Aerospace Center, DLR)两家机构提供多系统多类型 DCB 产品;加拿大自然资源部门(Natural Resources Canada, NRCan 或 EMR)、欧洲太空局(European Space Agency/European Space Operations Center, ESA/ESOC)、美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)、西班牙加泰罗尼亚理工大学(Universitat Politècnica de Catalunya, UPC)、武汉大学(Wuhan University, WHU)等机构提供单类型 DCB 产品。

统计不同机构的 GNSS DCB 产品类型及估计方法如下表所示:

机构	数据源	GNSS 系统	DCB 类型	估计方法
CAS	MCEV	GPS+GLONASS+	多系统	IGGDCB
CAS	MGEA	BDS+Galileo+QZSS	多类型 DCB	DCB 估计
CODE			畄米刑 DCD	TEC 建模(球谐函数)
CODE	105	GPS+GLONASS	平关型 DCD	同时估计 DCB
	MCEV	GPS+GLONASS+	多系统	使用 GIM 扣除 TEC
DLR	MGEA	BDS+Galileo+QZSS	多类型 DCB	DCB 估计
			光光型での	TEC 建模(球谐函数)
EMK	EMR IGS GPS+GLO	GPS+GLONASS		同时估计 DCB
		CDC	出来到 DCD	TEC 建模(球谐函数)
ESA	ESA IGS GPS		与 平关型 DCB	同时估计 DCB
IDI		CDC	出来到 DCD	TEC 建模(格网模型)
JPL	102	GPS	甲尖型 DCB	同时估计 DCB
UDC	ICC	CDC	光光型 DGD	TEC 建模(格网模型)
UPC	IGS	GPS 单	甲尖型 DCB	同时估计 DCB
XX /1 XI Y		CDC	TEC 建模	TEC 建模(球谐函数)
WHU	IGS	GPS	甲尖型 DCB	同时估计 DCB

表 1.2 不同机构的 GNSS DCB 产品类型及估计方法

频内偏差的估计方法可分为 3 类: (1) 与卫星钟差同步估计; (2) 对应码 观测量作差,逐历元求和后取平均,估计卫星及接收机(Satellite plus Receiver, SPR)频内偏差参数; (3) 基于 PPP 技术确定频内偏差。频间偏差的估计方式 主要有 2 种: (1) 在电离层建模时同步估计频间偏差; (2) 使用经验值或者电 离层模型修正电离层 TEC 之后,再获得 SPR 频间偏差参数。由于卫星及接收机 频间偏差参数是线性相关的,需要引入参考基准来实现卫星和接收机 DCB 参数 的分离,通常采用的参考基准有 3 类^[9]: (1) 将某台经过硬件延迟标定的接收机 作为参考基准, GPS 地面运控系统采用此方法; (2) 以所有卫星构造"零均值" 基准, IGS 及 MGEX 的 DCB 产品均使用该方法; (3) 选取部分 DCB 参数较为 稳定的卫星构造"拟稳"基准。

CAS 和 DLR 均向 IGS 提交多系统 DCB 产品,对于 DCB 产品的评估和分析 将主要基于两家分析中心发布的数据产品。CAS 和 DLR 的 DCB 产品处理方法 总结如下表所示:

机构	频内偏差处理方式	频间偏差处理方式
CAG	而加测是如人有利	逐测站电离层 TEC 建模,
CAS	妈观测重组合侍到	并同步估计 DCB 参数
DLR	而加测是如人有利	利用 GIMs 扣除电离层 TEC,
	吗观测重组合得到	进而获得 DCB 参数

表 1.3 CAS 和 DLR 的 GNSS 差分码偏差产品处理方法

CAS 和 DLR 解算频内偏差的方法相同,是选取对应的码观测量直接组合得 到;而在解算频间偏差参数时,两家机构采用了不同的电离层 TEC 处理方法: DLR 采用全球电离层地图(Global Ionospheric Maps, GIMs)数据扣除电离层 TEC 影响^[10],而 CAS 则采用 IGGDCB (Institute of Geodesy and Geophysics Differential Code Bias)方法^[11],逐测站利用广义三角级数进行电离层建模,并同时估计 DCB^[12]。

1.2.2 DCB 稳定度研究现状

稳定的卫星 DCB 能够更好地服务于钟差解算^[13]、GNSS TEC 高精度提取^[14]和 PPP^[15]。王宁波对比了 CAS 和 DLR 发布的 2013-2014年 GPS 卫星 C1W-C2W、C1C-C5X 及 C1C-C7Q 和 BDS-2 卫星 C2I-C7I 频间偏差产品的稳定度,结果表明DLR 频间偏差产品的月稳定度略优于 CAS,但是未评估 GPS 卫星频内偏差产品的稳定度^[16];任晓东评估了 CAS 和 DLR 2015-2016年 GPS 卫星 C2W-C2S 频内偏差、C1W-C2W 和 C1C-C5Q 频间偏差产品的月稳定度,由于单站电离层建模易受到测站位置影响,CAS 产品的月稳定度总体较差,未评估 BDS 卫星的月稳定度^[17]。

他们所评估产品的时间段距离当下较远,且卫星所处空间环境发生的变化、 卫星运行过程中的设备老化、不同类型卫星的更替,均可能导致卫星 DCB 参数 的改变;此外,还有 BDS-3 卫星的增多以及 DCB 产品类型的增加。目前,现有 的 DCB 产品评估与分析主要基于 GPS 卫星 DCB 产品,对于 BDS 卫星 DCB 产品的评估与分析较少,值得进行评估^[18]。因此,有必要对更为近期的卫星 DCB 产品的稳定度进行评估。

1.2.3 DCB 时变特性研究现状

许多学者在分析 DCB 时间序列时,发现其存在长期趋势项,且部分 DCB 存 在周期特性。

黄良珂等学者的研究结果表明,采用 GIMs 数据解算得到的南北半球不同经 度圈的峰值不对称指数,存在年和季节性的周期^[19];Zhong 等学者分析了2002-2013 年期间的 GPS 卫星 DCB 时间序列,提出电离层的变化并不是导致 GPS 卫 星 DCB 时间序列存在长期趋势项的原因,而归因于使用不同的卫星类型替换了 GPS 卫星,以及在卫星 DCB 和接收机 DCB 分离时,对所有卫星 DCB 施加的零 均值基准条件^[20]。杨海彦使用了2013 年 01 月 01 日-2016 年 09 月 30 日的 GPS 卫星 DCB 数据,该时间段的数据同样呈现明显的趋势项,并且所有卫星的变化 趋势相同,同时还分析了 IGS 事后电离层产品中的接收机 DCB,发现存在近年 周期变化,并初步判断与电离层 TEC 的周年变化有关^[21]。Choi 等学者基于2014-2016 年的电离层 TEC 和接收机 DCB 的数据,使用 Pearson 系数进行相关度分 析,研究显示,在中低纬度地区电离层 TEC 与接收机 DCB 的均方根 (Root Mean Square, RMS)即接收机 DCB 稳定性的相关性较大,相关系数存在纬度依赖性, 此外接收机 DCB 存在显著的半年和年周期变化^[22]。

频间 DCB 与电离层的强相关性导致了 DCB 估计精度受电离层估计误差的 影响,电离层的周期特性也可能会在 DCB 中有所体现。为了满足越来越高的定 位精度要求,有必要对 DCB 进行时变特性分析。

1.2.4 DCB 与弹性功率研究现状

弹性功率是指在 GNSS 信号之间重新分配传输功率,以保护用户免受干扰。 GPS Block IIR-M 和 Block IIF 类型的卫星能够执行弹性功率,在必要的时候,提 高部分卫星的信号发射功率,能够有效增强导航系统的抗干扰性能。

Steigenberger 等学者总结了 GPS 卫星在 2017-2018 年三种类型弹性功率模

式,第一种是大多数 Block IIF 卫星 L1 C/A 和 P (Y) 信号在区域永久启用的传输功率,第二种是所有正常运行中 Block IIR-M 和 Block IIF 卫星 L1 和 L2 信号在全球连续时间段的弹性功率,第三种是区域连续天数不连续时间段的弹性功率,三种模式的弹性功率均造成了相应 GPS 卫星信号 C/N₀ 的改变,也造成了天内DCB 的变化,对 DCB 估计的影响最大可达 0.8ns^[23];韩奇等也关注了 2018 年 04 月 GPS 卫星功率增强的变化,并且分析得到不同站点观测到的载噪比均有增加但略有不同^[24];刘苗苗等学者发现 2019 年 06 月 GPS P (Y)即军码再次增强,研究结果表明,弹性功率下,不同厂家的接收机功率变化曲线不一样^[25];Esenbuğa等学者的研究发现,GPS Block IIF 类型卫星执行弹性功率时,对卫星 C1C-C1W 频内偏差估计的影响约为0.4ns,对卫星 C1C-C2W 频间偏差估计的影响约为0.1ns,对卫星 C2W-C2L 频内偏差估计的影响约为 0.03ns^[4]。

卫星运行弹性功率会改变 GNSS 信号的 C/N₀,影响 DCB 的估计,在进行 DCB 的时变特性分析时,需要考虑弹性功率的因素。

1.3 主要工作及内容安排

本课题主要开展 GNSS 差分码偏差估计和时变特性研究,一共分为七章:

第一章为绪论,首先介绍本课题的研究背景及意义,接着对 GNSS 差分码偏差的国内外研究现状进行概述,最后介绍本课题的主要工作及内容安排。

第二章为 GNSS 差分码偏差解算的相关原理与方法,首先介绍 GNSS 原始 观测方程和常用线性组合,然后介绍 GNSS 电离层观测量和电离层 TEC 提取方 法,最后详细介绍 GNSS 差分码偏差的定义和解算方法。

第三章为基于 TH 卫星观测数据的 DCB 产品解算,首先介绍不同机构的 DCB 产品的基准统一方法,然后给出了基于 TH 卫星以及地面测站观测数据解 算 DCB 单天解的结果,并与 CAS 和 DLR 发布的产品进行了对比,然后解算了 基于 TH 卫星以及地面测站 7 天观测数据的 DCB 参数,最后对结算结果进行分 析。

第四章为卫星差分码偏差产品的稳定度分析,在统一不同机构 DCB 产品基准的前提下,对 GPS 卫星频内偏差、GPS 卫星和 BDS 卫星频间偏差的稳定度进

行了评估,对评估结果进行了分析讨论。

第五章为卫星差分码偏差的长期时变特性分析,采用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)方法提取了 GPS 卫星频间偏差、GPS 卫星频内偏差的 周期项,对 GPS 卫星频间偏差和 GPS 卫星频内偏差的周期项进行了对比分析。

第六章在基于 GNSS 数据探测和分析 BDS 弹性功率特征的基础上,定量分 析弹性功率对 BDS 差分码偏差的影响,为弹性功率期间的 BDS 高精度定位奠定 基础。

第七章为总结与展望,对全文进行了概述总结,并指出实验的不足之处,最 后提出对此后研究工作的展望。

第二章 GNSS 差分码偏差解算的相关原理与方法

2.1 引言

GNSS 观测方程是处理与应用 GNSS 观测数据的基础,描述了观测值与坐标、各类误差项之间的关系。伪距观测值和载波相位观测值是 GNSS 最基本的两类观测值。伪距观测值是绝对距离观测量,可以实现三维绝对定位;载波相位观测值则是相对距离观测量,含有整周模糊度,测距精度较伪距观测值更高。

伪距观测信号又可以称为测码信号,不同频率或不同类型的测码信号在不同 类型卫星或接收机硬件通道传播时,经过的物理电路不同,因而发生的时间延迟 (或称硬件延迟)并不完全一致,两类测码信号的延迟差异,称为差分码偏差 (DCB)。由以上定义可知,码偏差是描述硬件延迟的绝对量,而差分码偏差是 描述硬件延迟的相对量。

根据硬件延迟的位置,DCB 可以分为发射端 DCB 和接收端 DCB;根据两 类测码信号的频率,当测码信号是相同频率不同类型时,它们之间的 DCB 称作 频内偏差(Intra-Frequency Bias);当测码信号是不同频率时,它们之间的 DCB 称为频间偏差(Inter-Frequency Bias)。

本章在 2.2 节介绍 GNSS 观测方程和常用的线性组合, 2.3 节介绍 GNSS 电 离层观测量和电离层总电子含量 TEC 及其提取方法; 2.4 节介绍利用码观测量组 合进行频内偏差解算的方法。在 2.5 节介绍 CAS 和 DLR 分析中心的频间偏差解 算方法。

2.2 GNSS 观测方程和常用的线性组合

2.2.1 GNSS 观测方程

原始伪距和原始载波相位观测方程如下:

$$P_{r,f}^{s} = \rho_{r}^{s} + c\left(\Delta t_{r} - \Delta t^{s}\right) + \alpha_{k}I_{r}^{s} + T_{r}^{s} + c\left(b_{r,f} + b^{s,f}\right) + \varepsilon_{p} \#(2-1)$$
$$L_{r,f}^{s} = \rho_{r}^{s} + c\left(\Delta t_{r} - \Delta t^{s}\right) - \alpha_{k}I_{r}^{s} + T_{r}^{s} + \lambda_{r,f}^{s}\left(N_{r,f}^{s} + B_{r,f} + B^{s,f}\right) + \varepsilon_{L} \#(2-2)$$

以上两个方程中符号与变量的含义如:

上标 s 表示卫星 PRN (Pseudo-Random Noise) 号;

下标r表示接收机 ID;

下标 f 表示信号频率;

 $P_{r_f}^s$ 表示卫星s和接收机r之间的伪距观测值,单位米(m);

 $L_{r,f}^{s}$ 表示卫星s和接收机r之间的载波相位观测值,单位 m;

 ρ_{r}^{s} 表示卫星s和接收机r之间的几何距离,单位 m;

c表示真空中的光速, c=2.99792458×108m/s;

 Δt_r 表示接收机 r 的钟差,单位秒 (s);

 Λt^s 表示卫星s的钟差,单位s;

 α_k 表示与频率相关的转换因子, $\alpha_k = 40.28/f_k^2$, f_k 表示信号频率;

I_r表示卫星s与接收机r在视线方向的电离层时间延迟,单位m;

 T_s^s 表示卫星s与接收机r在视线方向的对流层时间延迟,单位 m;

 $\lambda_{r,f}^{s}$ 表示载波相位波长,单位 m;

N^s_r表示载波相位整周模糊度,单位周;

 b_{rf} 表示测距码信号在接收机端r的硬件延迟,单位 s;

 $b^{s,f}$ 表示测距码信号在卫星端s的硬件延迟,单位s;

 $B_{r,f}$ 表示载波信号在接收机r端的硬件延迟,单位周;

 $B^{s,f}$ 表示载波信号在卫星s端的硬件延迟,单位周;

 ε_p 表示测码信号的其他误差改正项,如多路径效应、观测噪声等,单位 s;

 ε_r 表示载波信号的其他误差改正项,如多路径效应、观测噪声等,单位周;

载波相位观测值方程中,硬件延迟的单位是周,通过电磁波信号的速度波长 关系,转换为以秒为单位的硬件延迟,得到以下公式:

$$L_{r,f}^{s} = \rho_{r}^{s} + c\left(\Delta t_{r} - \Delta t^{s}\right) - \alpha_{k}I_{r}^{s} + T_{r}^{s} + c\left(b_{r,f} + b^{s,f}\right) + \lambda_{r,f}^{s}N_{r,f}^{s} + \varepsilon_{L}\#(2-3)$$

2.2.2 常用的线性组合

在实际的 GNSS 数据处理中,通常基于原始观测方程和差分原理,进行不同 类型观测值的线性组合,以达到消除误差参数或提取目标物理量的目的。本节介 绍常用的无电离层组合、无几何组合、宽巷组合、窄巷组合和 MW 组合。

1) 无电离层组合(Ionosphere-Free Combination, IF):

GNSS 数据处理中,常采用无电离层组合来消除一阶电离层的影响,无电离 层组合可以根据观测信号的频率分为单频无电离层组合和双频无电离层组合。伪 距信号和载波信号在电离层中的延迟误差是大小相等、符号相反的,将两者的观 测方程求和之后取平均,得到单频伪距观测值和载波相位观测值的无电离层组合 公式如下:

 $P_{r,\text{IF}}^{s} = \left(P_{r,f}^{s} + L_{r,f}^{s}\right) / 2 \# (2-4)$

使用双频观测值数据时,无电离层组合是最常用的组合方式,常用于广播星 历中的卫星钟差解算、精密定轨和定位。与单频无电离层组合一样,双频伪距观 测值和载波相位观测值,可以分别形成双频无关组合,公式如下:

$$P_{3} = \frac{f_{1}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} P_{1} - \frac{f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} P_{2} \# (2 - 5)$$
$$L_{3} = \frac{f_{1}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} L_{1} - \frac{f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} L_{2} \# (2 - 6)$$

2) 无几何组合(Geometry-Free Combination, GF):

我们将 GNSS 原始观测方程中,与频率无关的误差参数,如卫星s与接收机 r的几何距离 ρ_r^s 、卫星钟差 Δt^s 、接收机钟差 Δt_r 和对流层时间延迟 T_r^s 等,称为 几何误差。GNSS 原始观测方程经过无几何组合(又称几何无关组合、电离层残 差组合)消除几何误差之后,保留下来了电离层时间延迟、卫星硬件时间延迟、 接收机硬件时间延迟等与频率相关的项,可以用于电离层 TEC 提取。伪距观测 值和载波相位观测值的无几何组合公式如下:

$$P_4 = P_1 - P_2 \# (2 - 7)$$

$$L_4 = L_1 - L_2 \# (2 - 8)$$

3) 宽巷组合(Wide-Lane Combination, WL):

载波相位观测值在具体应用时,整周模糊度的求解是一个关键点。在测量噪 声量相同的前提下,当组合观测值的载波波长越长,载波信号观测值的整周模糊 度求解越有利。

以 GPS 为例,宽巷测量是由 L1、L2 双频相位观测值,选取系数对(1,-1) 构造宽巷组合,能够获得具有长波长的组合观测值,具体公式如下:

$$L_5 = \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_1 - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_2 \# (2 - 9)$$

4) 窄巷组合(Narrow-Lane Combination, NL):

窄巷组合的系数对为(1,1),组合观测值的波长较短,虽然不利于计算整 周模糊度,但均方误差减小,能够应用于精密定位。窄巷组合的公式如下:

$$L_6 = \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_1 + \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_2 \# (2 - 10)$$

$$P_6 = \frac{f_1}{f_1 - f_2} P_1 + \frac{f_2}{f_1 - f_2} P_2 \# (2 - 11)$$

5) MW 组合 (Melbourne-Wubbena Combination, MW):

MW 组合是载波相位 WL 和伪距 NL 的再组合, Melbourne 和 Wubbena 是该组合的首次提出者。MW 组合消除了卫星^s与接收机r之间的几何距离、卫星钟差、接收机钟差、对流层时间延迟、电离层时间延迟,具体公式如下:

 $L_5 - P_6 + \Delta N \cdot \Delta \lambda = 0 \# (2 - 12)$

 $\Delta N = N_1 - N_2 \# (2 - 13)$

$$\Delta \lambda = \frac{c}{\Delta f} = \frac{c}{f_1 - f_2} \# (2 - 14)$$

公式中, N₁-N₂表示包含载波相位观测值的硬件延迟的浮点模糊度。从公 式可以看出, MW 组合观测值包含宽巷模糊度, 受观测噪声和多路径的影响, 可 以用于探测 GNSS 数据的周跳以及固定宽巷模糊度。

2.3 GNSS 电离层观测量和电离层 TEC 提取方法

2.3.1 GNSS 电离层时间延迟

从无几何组合可以看出,电离层延迟的处理在硬件延迟的解算中非常重要。 电离层是指距离地面 60km~2000km 的大气层空间,其中存在着地球高层大气受 到太阳辐射后电离产生的大量自由电子,它们导致穿过电离层的电磁波信号,发 生传播方向、速度等方面的变化。GNSS 信号在电离层传播的速度受路径中电子 密度影响。

伪距观测值和载波相位观测值的电离层延迟的公式如下:

$$I_{p} = \frac{1}{c} \int_{s}^{r} (n_{g} - 1) dl = \frac{40.28}{cf^{2}} \int_{s}^{r} n_{e} dl = \frac{40.28}{cf^{2}} TEC \# (2 - 15)$$

$$I_{L} = \frac{1}{c} \int_{s}^{r} (n_{p} - 1) dl = -\frac{40.28}{cf^{2}} \int_{s}^{r} n_{e} dl = -\frac{40.28}{cf^{2}} TEC \# (2 - 16)$$

$$n_{g} = 1 + 40.28 \frac{n_{e}}{f^{2}} \# (2 - 17)$$

$$n_{p} = 1 - 40.28 \frac{n_{e}}{f^{2}} \# (2 - 18)$$

$$TEC = \int_{s}^{r} n_{e} dl \, \# (2 - 19)$$

以上公式中变量和符号的含义如下:

r: 表示伪距信号或载波信号传播路径1的上限位置;

s: 表示伪距信号或载波信号传播路径l的下限位置;

 I_p :表示伪距信号沿信号传播路径的群延迟,即 GNSS 原始观测方程中伪距信号的电离层参数项,符号为正;

 I_L :表示载波信号沿信号传播路径的群延迟,即 GNSS 原始观测方程中载 波信号的电离层参数项,符号为负;

n_e:表示电离层电子密度;

n_g: 表示伪距信号的群折射率;

 n_p :表示载波信号的相折射率;

TEC:表示电离层电子密度 n_e沿 GNSS 信号传播路径的积分值。

2.3.2 GNSS 电离层观测量提取方法

由于 GNSS 观测值中包含卫星和接收机(Satellite plus Receiver, SPR)硬件 延迟,且它们与电离层延迟一样,都与频率相关,GNSS 电离层观测值便是电离 层 TEC 和 SPR DCB 之和^[26],也可以称为原始电离层 TEC 提取值。常用的电离 层观测量提取方法如下:

1) 伪距无几何观测量:

无几何观测量即上节提到的电离层残差组合,伪距的无几何观测值表达式展 开如下公式:

$$P_4 = P_2 - P_1 = I_2 - I_1 + b_{P_2}^r - b_{P_1}^r - (b_{P_2}^s - b_{P_1}^s) + \varepsilon_{P_4} \# (2 - 20)$$

公式中,包含了 DCB,即:

$$DCB_{P_1/P_2}^r = b_{P_2}^r - b_{P_1}^r \# (2 - 21)$$

$$DCB^{s}_{P_{1}/P_{2}} = b^{s}_{P_{2}} - b^{s}_{P_{1}} \#(2-22)$$

整合以上公式,获得伪距无几何观测值的表达式如下:

$$P_4 = P_2 - P_1 = I_2 - I_1 + DCB_{P_1/P_2}^r - DCB_{P_1/P_2}^s + \varepsilon_{P_4} \# (2 - 23)$$

综合电离层延迟公式和伪距无几何观测值表达式,得到卫星 s 和接收机 r 在 视线方向电子含量即 STEC (Slant Total Electron Content),表达式如下:

$$STEC = \left(P_4 - DCB_{P_1/P_2}^r + DCB_{P_1/P_2}^s\right) / f_2^{-2} - f_1^{-2} \# (2 - 24)$$

以 GPS 为例, L1 的频率 f_1 =1575.42MHz, L2 的频率 f_2 =1227.60MHz, 则 TEC 的表达式为:

$$STEC = 9.52478 \cdot \left(P_4 - DCB_{P_1/P_2}^r + DCB_{P_1/P_2}^s\right) \# (2 - 25)$$

2) 相位无几何观测量:

载波相位的无几何观测值表达式展开如下公式:

$$L_4 = L_2 - L_1 = I_2 - I_1 + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) + b_{L_2}^r - b_{L_1}^r - (b_{L_2}^s - b_{L_1}^s) + \varepsilon_{L_4} \# (2 - 26)$$

当定义电离层模糊度项的表达式为如下公式:

$$B_{1} = (\lambda_{1}N_{1} - \lambda_{2}N_{2}) + b_{L_{2}}^{r} - b_{L_{1}}^{r} - (b_{L_{2}}^{s} - b_{L_{1}}^{s}) \# (2 - 27)$$

载波相位的无几何观测值表达式即为以下公式:

$$L_4 = L_2 - L_1 = I_2 - I_1 + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) + B_1 + \varepsilon_{L_4} \# (2 - 28)$$

3) 相位平滑伪距无几何观测量:

为减小伪距噪声和多路径误差,在数据处理中常使用相位观测值对伪距观测 值进行平滑。一个连续弧段内,将伪距和相位无几何观测量求和,然后取平均值, 结果如下式:

$$\langle L_4 - P_4 \rangle_{\rm arc} = \sum_{i=1}^N (L_4 - P_4) / N = B_1 - (DCB^{\rm r}_{P_1/P_2} - DCB^{\rm s}_{P_1/P_2}) + \varepsilon_{\langle p \rangle} \#(2 - 29)$$

式中,N为平弧段内滑历元数,将上式带入相位无几何观测量公式,得到相位平滑伪距观测量:

$$SP_{4} = L_{4} - \langle L_{4} - P_{4} \rangle_{arc} = I_{2} - I_{1} + \left(DCB_{P_{1}/P_{2}}^{r} - DCB_{P_{1}/P_{2}}^{s} \right) + \varepsilon_{SP_{4}} \# (2 - 30)$$

由上式可得,平滑的过程,没有增加额外的约束,在减弱了伪距观测值误差 影响的同时,还避免了载波相位信号模糊度的影响,因而相位平滑伪距是提取电 离层观测量的主要方法。

2.4 频内偏差解算方法

2.4.1 频内偏差参数定义

当测码信号是相同频率不同类型时,它们之间的 DCB 称作频内偏差(Intra-Frequency Bias)。以美国 GPS 播发的 L1/L2/L5 信号为例,如下图所示,蓝色箭 头代表的即为 P1-C1、P2-C2 和 P5-C5 三个频内偏差参数。



图 2.1 GPS 卫星频内偏差的简易示意图

本节介绍通过码观测量直接组合计算得到频内偏差参数的方法。

2.4.2 码观测量直接组合计算频内偏差参数

以 GPS 卫星系统 L1 频率上的 C1 和 P1 为例,基本观测方程如下。

 $P_{r,C1}^{s} = \rho_{r}^{s} + c \cdot (dt_{r} - dt^{s}) + d_{orb}^{s} + T_{r}^{s} + I_{r,1}^{s} - c \cdot B_{r,C1} - c \cdot B_{C1}^{s} + rel_{r,C1}^{s} + \varepsilon_{r,C1}^{s} \# (2 - 31)$ $P_{r,P1}^{s} = \rho_{r}^{s} + c \cdot (dt_{r} - dt^{s}) + d_{orb}^{s} + T_{r}^{s} + I_{r,1}^{s} - c \cdot B_{r,P1} - c \cdot B_{P1}^{s} + rel_{r,P1}^{s} + \varepsilon_{r,P1}^{s} \# (2 - 32)$ $\vec{x}, \psi;$

 $P_{r,c1}^{s}$ 和 $P_{r,p1}^{s}$ 分别表示接收机r到观测卫星s在L1频率上的两种码观测值;

 ρ_r^s 表示接收机r到卫星s的几何距离;

c表示光在真空中的传播速度;

 dt_r 和 dt^s 表示接收机 r 的钟差和卫星 s 的钟差;

 d_{orb}^{s} 表示卫星s的轨道误差;

 T_r^s 表示接收机r到卫星s观测路径上的对流层延迟;

 $I_{r_1}^s$ 表示接收机r到卫星s观测路径上的电离层延迟;

 $B_{r,CI}$ 和 $B_{r,PI}^{s}$ 表示接收机端与卫星端在L1频率上的伪距硬件延迟;

 $rel_{r,C1}^{s}$ 和 $rel_{r,P1}^{s}$ 表示接收机 r 与卫星 s 的相对论效应;

 ε_{r,c_1}^{s} 和 ε_{r,p_1}^{s} 表示 L1 频率上的两种码观测值的观测噪声以及多路径效应等未模型化的误差。

由于两种码观测值的频率和传播路径相同,两个公式中与频率和空间有关的 误差在理论上是一致的。两式作差,构成无几何距离观测值,得到以下公式。

$$P_{r,C1}^{s} - P_{r,P1}^{s} = c \cdot (B_{r,P1} + B_{P1}^{s} - B_{r,C1} - B_{C1}^{s}) + rel_{r,C1}^{s} + \varepsilon_{r,C1}^{s} - rel_{r,P1}^{s} - \varepsilon_{r,P1}^{s}$$

= $c \cdot (DCB_{P1-C1}^{s} + DCB_{r,P1-C1}) + rel_{r,C1}^{s} + \varepsilon_{r,C1}^{s} - rel_{r,P1}^{s} - \varepsilon_{r,P1}^{s}$ #(2 - 33)

式中, *DCB^s*_{PI-CI}表示第s个卫星的频内偏差; *DCB_{r,PI-CI}*表示第r个接收机的频内偏差。

IGS 的分析中心在计算 DCB 时,通常认为卫星和接收机的 DCB 参数在解算

当天内稳定不变,作为常数估计,基于此,对天内所有历元的观测值取平均。取 平均一方面可以获得卫星端和接收机端的频内偏差之和,另一方面也可以同时减 少观测值噪声和多路径效应的影响。下式是取平均并忽略观测值噪声和多路径效 应之后, SPR 频内偏差的表达式。

$$SPR_{r,P1-C1}^{s} = DCB_{P1-C1}^{s} + DCB_{r,P1-C1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(P_{r,C1}^{s,i} - P_{r,P1}^{s,i} \right) / c \#(2 - 34)$$

式中, *SPR*^s_{r,P1-C1}表示卫星 s 与接收机 r 的频内偏差之和, n 表示所使用观测 值的时间段内总历元数, *i* 表示单个历元。

由上式可知,卫星和接收机的频内偏差是线性相关的,两者分离的方法将在 下节介绍。

2.5 频间偏差解算方法

2.5.1 频间偏差参数定义

当测码信号是不同频率时,它们之间的 DCB 称为频间偏差(Inter-Frequency Bias)。同样以美国 GPS 播发的 L1/L2/L5 信号为例,如下图所示,橙色箭头代表的即为 P1-P2 和 P1-P5 两个频间偏差参数。



图 2.2 GPS 卫星频间偏差的简易示意图

2.5.2 频间偏差估计方法

用于解算频间偏差的观测方程如下:

$$\begin{split} P_{r,L_{m}}^{s} &= \rho_{r}^{s} + c \cdot \left(dt_{r} - dt^{s} \right) + d_{orb}^{s} + T_{r}^{s} + I_{r,m}^{s} - c \cdot B_{r,L_{m}} - c \cdot B_{L_{m}}^{s} + rel_{r,L_{m}}^{s} + \varepsilon_{r,L_{m}}^{s} \# (2 - 35) \\ P_{r,L_{n}}^{s} &= \rho_{r}^{s} + c \cdot \left(dt_{r} - dt^{s} \right) + d_{orb}^{s} + T_{r}^{s} + I_{r,n}^{s} - c \cdot B_{r,L_{n}} - c \cdot B_{L_{n}}^{s} + rel_{r,L_{n}}^{s} + \varepsilon_{r,L_{n}}^{s} \# (2 - 36) \\ &$$

 $\vec{x} + P_{r,L_{m}}^{s} \pi P_{r,L_{n}}^{s} \# B_{r,L_{n}} \# B_{r,L_{n$

1)和(2-2)的参数含义一致。

由于两个信号的频率不同,各自与频率相关的误差并不相同,无法像求解频 内偏差一样,采用无几何组合观测值来消除电离层影响,需要使用电离层模型同 步估计法或产品修正法,获得频间偏差。

CAS 是采用 IGGDCB(Institute of Geodesy and Geophysics Differential Code Bias)方法,逐测站利用广义三角级数进行电离层建模,并同时估计 DCB。而 DLR 则是采用 GIMs 数据扣除电离层 TEC 影响,获得 SPR 频间偏差参数。下面 具体介绍两家分析中心的分析方法。

2.5.3 DLR 估计频间偏差的方法

DLR 采用 GIMs 直接扣除电离层 TEC 获得 SPR 频间偏差,是基于全球范围的 GNSS 基准站进行 DCB 解算。以下是 DLR 解算 DCB 的基本模型。

$$\boldsymbol{L}_{SPR} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{X}_{DCB} \, \# (2 - 37)$$

式中, L_{SPR} 表示卫星和接收机频间偏差 n×1的列向量, F 表示设计矩阵, X DCB 表示卫星和接收机的待估 DCB 向量;其中 F 和 X DCB 具体如下式:

$$X_{DCB} = \left[X_{u_1,1}^{\mathrm{T}}, X_{u_2,1}^{\mathrm{T}} \right]^{\mathrm{T}} \# (2 - 38)$$
$$F_{n \times (u_1 + u_2)} = \left[A_{n \times u_1}, B_{n \times u_2} \right] \# (2 - 39)$$

式中, $X_{sat,DCB}$ 表示卫星的 DCB 参数向量、 $X_{rev,DCB}$ 表示接收机的 DCB 参数 向量; A 表示卫星的设计矩阵, B 表示接收机的设计矩阵,矩阵中,与 DCB 对 应行的元素为 1,其余的为 0; u1 表示卫星个数,u2 表示接收机个数,对应于待 估计的卫星 DCB 和接收机 DCB 参数个数,因此 DCB 总数u = u1 + u2。

然后施加零均值基准约束,获得卫星和接收机的 DCB 参数。零均值约束的 模型如下:

$$S \cdot X_{DCB} = 0 \# (2 - 40)$$

$$S_{1 \times (u1+u2)} = [\underbrace{e}_{1 \times u1} \underbrace{0}_{1 \times u2}], e = [1, \dots, 1] \# (2 - 41)$$

此外,由于码观测值存在噪声等影响因素,对于 L_{spr} 向量观测值需要根据获取的方式,进行定权,基于广义平差法得到以下公式:

$$X_{DCB} = (N + S^{T}S)^{-1}W \#(2 - 42)$$

$$D_{\hat{x}\hat{x}} = \sigma_0^2 \cdot (N + S^{\mathrm{T}}S)^{-1} # (2 - 43)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{F}^{\mathrm{T}} \mathbf{P} \mathbf{F}, \quad \mathbf{W} = \mathbf{F}^{\mathrm{T}} \mathbf{P} \mathbf{L}_{SPR} \# (2 - 44)$$

公式中, X_{DCB} 是卫星和接收机的 DCB 参数, $D_{\hat{x}\hat{x}}$ 是 DCB 参数的协方差矩阵, σ_0^2 是单位权方差。

DLR 在估计 DCB 时,使用全球范围的 GNSS 站进行同步解算,忽略了一部 分卫星 DCB 的有效性和稳定性。

2.5.4 CAS 估计频间偏差的方法

CAS 采用的 IGGDCB 方法,是使用广义三角函数,逐测站进行局部电离层 建模,避免了对全球范围内大量 GNSS 基准站的外部电离层信息依赖,在 BDS 基准站的数量不足和分布不均的情况下,解决了电离层建模的难题。

IGGDCB 方法基于单站电离层 TEC 建模确定 SPR 频间偏差初值,设定标准 差阈值,将 DCB 标准差不合格的卫星剔除,避免它们对频间偏差最终估值的影 响,使用 DCB 较为稳定的卫星构成零均值基准,计算所有卫星的 DCB 参数。

IGGDCB 所使用的广义三角函数模型(the Generalized Triangular Series Function, GTSF)能够较好地模拟局部电离层 TEC,使单站电离层建模具有较好的精度。GTSF 的基本模型和 VTEC 与 STEC 转换有以下公式:

 $STEC(\varphi, h, z) = VTEC(\varphi, h) \cdot M(z) \# (2 - 45)$

$$VTEC(\varphi,h) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} \left(E_{nm} \left(\varphi - \varphi_0 \right)^n \cdot h^m \right) + \sum_{k=0}^{k_{max}} \left(C_k \cos(k \cdot h) + S_k \sin(k \cdot h) \right) \# (2 - 46)$$
$$h = \frac{2\pi \left(t_{loc} - 14 \right)}{T_{sum}}, \left(T_{sum} = 24h \right) \# (2 - 47)$$

$$M(z) = \left(1 - \frac{\sin^2(z)}{\left(1 + H_{\rm ion} / R_{\rm E}\right)^2}\right)^{-1/2} \#(2 - 48)$$

公式中:

 φ 表示信号电离层穿刺点(Intersecting Pierce Point, IPP)的地理纬度;

h表示信号 IPP 处的太阳经度,即与地方时相关的函数;

z表示接收机处的卫星天顶距;

M(z)表示 VTEC 向 STEC 转换的映射函数,此处采用的是余弦函数;

 φ_0 表示接收机位置处的地理纬度;

 $n_{\max}, m_{\max}, k_{\max}$ 表示多项式函数和三角级数函数的最大阶次, IGGDCB 的设置为 2, 2, 4;

 E_{nm}, C_k, S_k 表示广义三角级数函数待估的模型参数;

 t_{loc} 表示接收机位置的当地时间;

Him 表示中心电离层的高度,此模型取 375km;

 R_E 表示平均地球半径;

IGGDCB采用的卫星 DCB 筛选标准如下:

$$\gamma = \frac{\left| DCB^{s, \text{ after }} - DCB^{s, \text{ before }} \right|}{\hat{\sigma}_{\text{before }}}, \begin{cases} \gamma \le \gamma_0, \text{ stable }\\ \gamma > \gamma_0, \text{ unstable } \end{cases} \#(2 - 49)$$

公式中, $DCB^{s, \text{ before}}$ 表示前一次估计的卫星 DCB, $DCB^{s, \text{ after}}$ 表示当前估计的卫星 DCB, $\hat{\sigma}_{\text{before}}$ 表示当前估计的卫星 DCB 均方根误差, γ_0 是阈值。

估计 DCB 的公式与 DLR 相同,不再复述。

2.6 本章小结

本章首先介绍了 GNSS 原始观测方程和 GNSS 数据处理中常用的线性组合, 然后阐述了 GNSS 电离层观测量和电离层 TEC 及其提取方法,接着介绍了频内 偏差的解算方法,最后分别阐述了 CAS 和 DLR 分析中心估计频间偏差参数的方 法,之后的产品评估和周期分析实验将基于两家分析中心的产品进行。

第三章 基于 TH 卫星观测数据的 DCB 产品解算

3.1 引言

天绘二号卫星系统 (TH-2) 是我国首个基于干涉合成孔径雷达技术的微波测 绘卫星系统,是国际上继德国 TanDEM-X 系统后的第 2 个微波干涉测绘卫星系 统。该系统工作于 X 频段,设计分辨率为 3m,处于 500km 的轨道,属于低轨卫 星,能够接收 GPS 和 BDS-2 的 GNSS 信号^[27]。TH-2 卫星观测数据类型的信息 如下表所示。

表 3.1 TH-2 卫星观测数据类型信息

GNSS 系统	伪距数据		相位	数据
GPS	C1C	C2W	L1C	L2W
BDS	C2I	C6I	L2I	L6I

本章将基于 TH-2 01 号 (TH-2-01) 卫星的 GNSS 观测数据,采用无几何组合,使用 GIMs 数据,设定卫星零均值基准条件,进行 GPS 和 BDS-2 的 DCB 解算。首先在 3.2 节介绍在比较不同机构的 DCB 产品之前,统一基准的过程; 3.3 节进行了 GPS 和 BDS-2 DCB 的单天解算实验, 3.4 节进行了 GPS 和 BDS-2 DCB 的连续 7 天单天解实验。

3.2 DCB 产品基准统一方法

在 DCB 解算时,首先会获得卫星和接收机(Satellite plus Receiver, SPR) DCB 之和,然后在进行分离时引入了卫星零均值基准,不同机构采用的卫星、 同一机构不同天内采用的卫星可能不同,导致基准约束也并不相同。因此在进行 DCB 产品的评估和分析之前,需要进行基准统一。

首先介绍卫星零均值基准约束,公式如下:

$$I_{1 \times u} \hat{X} = 0 \# (3 - 1)$$

$$I_{1\times u} = [1\cdots 1]_{1\times u} \#(3-2)$$

公式中 u 为构成零均值基准约束的卫星总数; \hat{X} 表示在 u 颗卫星作为零均
值约束基准下的卫星 DCB 估值。

要统一不同机构的约束基准,可以采用待对比的不同产品中均存在的卫星,构造新的基准。假定有 *u*₁颗公共卫星,则新的基准约束为:

$$S_{1 \times u} X'_{u \times 1} = 0 \# (3 - 3)$$

$$S_{1 \times u} = \begin{bmatrix} I \\ 1 \times u_1 \\ 1 \times u_2 \end{bmatrix}, \hat{X}'_{u \times 1} = \begin{bmatrix} \hat{X}'_1 & \hat{X}'_2 \\ 1 \times u_1 & 1 \times u_2 \end{bmatrix}^T \# (3 - 4)$$

$$u = u_1 + u_2 \# (3 - 5)$$

公式中,*S*表示新卫星约束基准的列向量;*X*′表示新的约束基准下卫星 DCB 参数的估计值,具体如下公式:

$$\hat{X}' = \left(I - S^T \left(SS^T\right)^{-1} S\right) \hat{X} # (3-6)$$

后续的实验会对统一基准的具体过程作相应的说明。

3.3 GPS 和 BDS-2 单天 DCB 结果

DCB 单天解实验,分别基于 5 类数据进行:(1)TH-2-01 卫星的观测数据;
(2)1个 IGS 地面站的监测数据;(3)TH-2-01 卫星的观测数据和 2个 IGS 地面站的监测数据;(4)TH-2-01 卫星的观测数据和 5个 IGS 地面站的监测数据;

(5) TH-2-01 卫星的观测数据和 9 个 IGS 地面站的监测数据。数据的时间均是 2021 年 084 天, TH-2-01 号卫星的观测数据的采样率是 1Hz。

下表,后 5 列给出是基于以上 5 类数据获得的 GPS C1C-C2W 频间偏差单天 解结果,第 1 列是卫星伪随机噪声码(Pseudo-Random Noise, PRN)或测站名, 第 2 列和第 3 列分别是 CAS 和 DLR 的 DCB 产品值。

由于 2021 年 084 天 TH-2-01 卫星没有 G11 卫星的观测数据,单独采用 TH-2-01 观测数据解算 DCB 时,无 G11 卫星 DCB 结果。

在比较精度之前进行了基准统一:将 CAS 的 DCB 产品中,参与 DLR 或本 实验 DCB 解算的卫星 DCB 之和作为基准差异,从 DLR 或本实验的 DCB 解算 结果当中扣除。

PRN&Site	CAS	DLR	TH	1 测站	TH+2 测站	TH+5 测站	TH+9 测站
G01	-8.22	-8.14	-7.57	-8.10	-7.97	-8.03	-8.08
G02	9.35	9.30	9.98	9.82	9.56	9.16	9.18
G03	-6.32	-6.29	-6.19	-6.60	-6.45	-6.49	-6.36
G04	-1.47	-1.51	-0.93	-1.84	-1.52	-1.55	-1.55
G05	2.52	2.47	2.68	2.40	2.34	2.05	2.22
G06	-7.65	-7.55	-7.77	-7.66	-7.77	-7.49	-7.54
G07	3.22	3.03	3.36	3.51	3.26	3.14	3.09
G08	-6.76	-6.64	-7.46	-6.63	-6.95	-6.94	-6.78
G09	-4.58	-4.60	-4.78	-5.11	-4.84	-4.82	-4.57
G10	-5.74	-5.66	-5.45	-5.06	-5.65	-5.54	-5.57
G11	4.87	4.88			4.94	4.98	4.88
G12	3.72	3.83	3.96	3.72	3.75	3.79	3.91
G13	3.24	3.24	3.97	3.37	3.47	2.89	3.04
G14	0.67	0.61	1.12	0.79	0.67	0.48	0.57
G15	2.24	2.12	2.48	1.89	2.17	1.86	1.94
G16	4.25	4.14	3.67	4.27	3.90	4.30	4.22
G17	2.90	2.91	3.35	3.26	3.02	2.98	2.87
G18	0.89	0.98	1.31	0.92	0.96	0.95	0.91
G19	8.66	8.64	9.89	9.30	9.10	8.90	8.73
G20	3.88	3.82	3.90	4.19	3.73	3.79	3.77
G21	4.86	4.73	4.58	5.40	4.69	4.68	4.67
G22	10.61	10.37	10.13	10.90	10.32	10.15	10.26
G23	0.93	0.99	1.40	1.19	1.03	0.98	0.98
G24	-6.37	-6.42	-6.37	-6.28	-6.23	-6.19	-6.30
G25	-6.74	-6.55	-7.02	-6.28	-6.66	-6.41	-6.45
G26	-8.38	-8.26	-8.64	-8.77	-8.72	-8.19	-8.18
G27	-4.67	-4.57	-5.31	-4.32	-4.83	-4.49	-4.55
G28	4.46	4.39	4.59	4.81	4.49	4.39	4.38
G29	2.20	2.28	3.31	1.80	2.59	2.49	2.32
G30	-5.49	-5.52	-5.09	-5.26	-5.31	-5.33	-5.41
G31	4.12	4.17	3.92	4.45	4.15	4.76	4.61
G32	-5.17	-5.16	-5.03	-4.10	-5.25	-5.23	-5.21
TH-2-01			-12.96		-12.79	-12.80	-12.79
AGGO	16.13	16.51		16.08	16.22	16.24	16.24
AMC4					13.25	13.26	13.26

表 3.2 2021 年 084 天 GPS C1C-C2W 频间偏差单天解

PRN&Site	CAS	DLR	TH	1 测站	TH+2 测站	TH+5 测站	TH+9 测站
AREG	5.11	6.07				6.40	6.41
AREQ	7.22					8.42	8.42
BAKO						2.98	3.02
BOR1	-12.98						-13.47
BREW	5.20						5.07
BRUX	9.43	9.08					9.10
CEBR	6.57	6.64					6.86

分析表格中 DCB 结果可得,只采用 TH-2-01 低轨卫星数据时,DCB 参数解 算精度为 1ns 量级,与只采用 1 个地面测站解算 DCB 的精度一致。随着地面测 站数目的增多,DCB 参数的解算精度也有所提升。

DCB 参数解算精度与测站数目增多之间的关系,如下图所示,图中以 CAS 提供的 DCB 为参考,给出了 DLR、TH 卫星以及 TH+地面测站解算结果的比较关系。横坐标是卫星 PRN,纵坐标是 DLR 或本课题解算的 DCB 与 CAS 的 DCB 之差。



图 3.1 基于不同数据的 GPS C1C-C2W 频间偏差解算结果

从图中可以看出当地面测站数目增加到 9 个时, GPS 卫星 DCB 的相符程度可以达到 0.5ns 量级。

由于 TH-2 卫星只能获取 BDS-2 卫星观测数据,下表给出了利用 TH-2-01 低 轨卫星以及地面测站数据解算 BDS-2 C2I-C6I 频间偏差的结果。

同样在精度对比之前,进行了基准统一,选取 C01-C14 卫星的均值重新构造 基准,并将其去掉。

PRN&Site	CAS	DLR	TH	1测站	TH+2 测站	TH+5	TH+9
C01	-0.63	8.79	-9.16	-8.62	-9.16	-9.14	-9.15
C02	5.10	14.39	-3.34		-3.33	-3.32	-3.32
C03	6.83	16.34	-0.93	-2.03	-0.93	-0.91	-0.92
C04	9.52	19.17	1.46	0.19	1.46	1.47	1.47
C05	3.56	13.06	-4.75		-4.74	-4.73	-4.73
C06	12.43	22.14	4.70	3.75	4.71	4.61	4.60
C07	18.79	28.43	10.93	9.96	10.93	10.70	10.70
C08	15.72	25.55	7.47	6.83	7.48	7.57	7.56
C09	11.13	20.90	3.26	2.73	3.26	3.22	3.22
C10	10.43	20.08	2.12	1.45	2.12	2.43	2.42
C11	8.10	17.85	-0.20	-0.62	-0.31	-0.32	-0.29
C12	7.54	17.25	-1.30	-1.06	-1.00	-0.78	-0.88
C13	-5.87	3.77	-13.27	-14.72	-13.27	-13.29	-13.32
C14	10.45	20.32	3.01	2.14	2.78	2.50	2.64
TH-2-01			9.21		9.20	9.19	9.19
AMC4					9.56	9.60	9.57
AREG	-2.38	-10.96			7.99	8.11	8.04
BOR1	34.39					42.50	42.50
BREW	10.40					20.32	20.29
BRUX	1.75	-8.18				10.39	10.40
CEBR	-3.18	-12.58					6.24
CR01							10.46
GODE							-0.23
GODN	0.82						6.96
USUD				2.84			

表 3.3 2021 年 084 天 BDS-2 C2I-C6I 频间偏差单天解

BDS-2 DCB 精度与测站数目增多之间的关系,如下图所示,图中以 CAS 提

供的 DCB 为参考,比较了 DLR 提供的 DCB 以及基于 5 类不同数据解算 DCB 的结果。横坐标是卫星 PRN,纵坐标同样是 DLR 或本课题解算的 DCB 与 CAS 的 DCB 之差。



图 3.2 基于不同数据的 BDS-2 C2I-C6I 频间偏差解算结果

从图中可以看出当地面测站数目增加到 9 个,卫星 DCB 相符程度可以达到 0.5ns 量级。只采用 TH 低轨卫星数据,DCB 精度为 1ns 量级,与只采用 1 个地 面测站解算 DCB 精度一致。由于北斗为混合星座,与单独采用 1 个地面测站相 比,低轨卫星对北斗的观测几何构型更优。

综合以上结果,使用低轨卫星+9个地面测站估计 DCB 参数,可获得与使用 全球 300 个左右地面测站(CAS)估计 DCB 比较相近、与使用全球 100 个左右 地面测站(DLR)估计 DCB 相同的解算精度。

3.4 GPS 和 BDS-2 7 天 DCB 结果

实验基于 2021 年 084-090 天 TH-2-01 卫星的观测数据,采样率 1Hz。下表 给出了综合利用 TH 低轨卫星以及地面测站解算 GPS 卫星 C1C-C2W 频间偏差 的结果。第1列是卫星 PRN 或测站名,第2-8 列是 2021 年 084 天-090 天的单天 解结果,第9 列是 7 天单天解的平均值,第10 列是标准差 (Standard Deviation, STD)。

PRN	Doy	Macr	CTD						
&Site	084	085	086	087	088	089	090	Mean	21D
G01	-8.10	-8.12	-8.05	-8.06	-8.05	-8.08	-8.07	-8.07	0.03
G02	9.30	9.34	9.32	9.29	8.58	9.36	9.30	9.21	0.28
G03	-6.32	-6.38	-6.31	-6.35	-6.36	-6.35	-6.35	-6.35	0.02
G04	-1.52	-1.51	-1.49	-1.51	-1.46	-1.47	-1.50	-1.49	0.02
G05	2.41	2.44	2.41	2.34	2.41	2.41	2.43	2.41	0.03
G06	-7.56	-7.59	-7.58	-7.58	-7.60	-7.50	-7.48	-7.56	0.05
G07	3.08	3.09	3.10	3.13	3.20	3.12	3.18	3.13	0.05
G08	-6.76	-6.79	-6.72	-6.69	-6.67	-6.74	-6.77	-6.73	0.04
G09	-4.56	-4.56	-4.53	-4.56	-4.55	-4.54	-4.53	-4.55	0.01
G10	-5.61	-5.64	-5.65	-5.65	-5.53	-5.65	-5.65	-5.63	0.04
G11	4.91	4.91	4.91	4.98	4.99	4.88	4.90	4.92	0.04
G12	3.82	3.87	3.79	3.79	3.80	3.76	3.76	3.80	0.04
G13	3.20	3.28	3.25	3.20	3.24	3.25	3.20	3.23	0.03
G14	0.57	0.55	0.50	0.54	0.58	0.51	0.45	0.53	0.05
G15	2.06	2.01	2.01	2.00	2.03	2.05	2.04	2.03	0.02
G16	4.13	4.10	4.14	4.17	4.31	4.18	4.16	4.17	0.07
G17	2.96	2.94	2.97	2.89	2.90	2.92	2.99	2.94	0.04
G18	0.88	0.82	0.78	0.82	0.81	0.84	0.93	0.84	0.05
G19	8.71	8.75	8.73	8.71	8.68	8.74	8.70	8.72	0.02
G20	3.75	3.80	3.76	3.70	3.75	3.74	3.71	3.75	0.03
G21	4.76	4.75	4.81	4.80	4.81	4.77	4.78	4.78	0.02
G22	10.45	10.39	10.50	10.52	10.48	10.48	10.47	10.47	0.04
G23	0.97	1.03	0.99	0.96	0.94	0.95	0.94	0.97	0.03
G24	-6.39	-6.30	-6.38	-6.39	-6.38	-6.40	-6.40	-6.38	0.04
G25	-6.62	-6.57	-6.62	-6.65	-6.64	-6.63	-6.70	-6.63	0.04

表 3.4 2021 年 084-090 天 GPS C1C-C2W 频间偏差解算结果

PRN	Doy								
&Site	084	085	086	087	088	089	090	Mean	STD
G26	-8.23	-8.25	-8.25	-8.22	-8.17	-8.19	-8.19	-8.22	0.03
G27	-4.57	-4.62	-4.61	-4.61	-4.58	-4.62	-4.69	-4.61	0.04
G28	4.40	4.40	4.36	4.41	4.47	4.34	4.31	4.38	0.05
G29	2.18	2.18	2.13	2.19	2.17	2.20	2.27	2.19	0.04
G30	-5.46	-5.44	-5.46	-5.45	-5.39	-5.48	-5.42	-5.44	0.03
G31	4.33	4.28	4.35	4.38	4.30	4.31	4.40	4.34	0.04
G32	-5.16	-5.15	-5.15	-5.12	-5.08	-5.16	-5.17	-5.14	0.03
TH-2-01	-12.79	-12.74	-12.75	-12.79	-12.78	-12.85	-12.90	-12.80	0.06
AGGO	16.23	16.34	16.46	16.34	6.35	6.44	6.31	12.07	5.33
AMC4	13.26	13.25	13.21	13.24	13.19	13.15	13.21	13.21	0.04
AREG	6.42	7.18	7.69	7.19	7.47	6.96	7.59	7.22	0.43
AREQ	8.44	9.20	9.77	9.17	9.20	8.96	9.53	9.18	0.42
BAKO	3.09	4.05	2.83	2.50	0.71	3.11	1.78	2.58	1.07
BOR1	-13.47	-13.54	-13.64	-13.55	-13.64	-13.64	-13.67	-13.59	0.07
BREW	5.08	5.05	4.95	4.95	4.87	4.98	5.23	5.02	0.12
BRUX	9.10	9.09	8.99	9.00	8.94	9.02	8.97	9.02	0.06
CEBR	6.86	6.99	6.84	6.80	6.95	6.78	6.67	6.84	0.11
CRO1	10.33	10.54	11.26	10.89	11.09	10.68	10.60	10.77	0.33
DAE2	-15.67	-15.74	-15.91	-15.94	-16.02	-16.16	-16.19	-15.95	0.20
DAEJ	-16.04	-16.10	-16.28	-16.33	-16.40	-16.51	-16.54	-16.31	0.19
DLF1	-16.24	-16.31	-16.36	-16.31	-16.42	-16.41	-16.50	-16.36	0.09
GODE	5.00	4.94	5.07	4.98	5.00	4.99	5.16	5.02	0.07
GODN	-5.08	-5.30	-5.26	-5.29	-5.38	-5.42	-5.09	-5.26	0.13
GODS	10.85	10.58	10.70	10.69	10.71	10.68	10.90	10.73	0.11
GOP6	6.93	6.93	6.80	6.80	6.83	6.95	6.99	6.89	0.08
GOP7	-10.71	-10.72	-10.83	-10.84	-10.78	-10.66	-10.60	-10.73	0.09

PRN	Doy								
&Site	084	085	086	087	088	089	090	Mean	STD
GOPE	-20.68	-20.71	-20.77	-20.74	-20.79	-20.75	-20.73	-20.74	0.04
HARB	7.86	7.52	7.47	7.49	7.51	7.43	7.48	7.54	0.15
HERS	7.32	7.27	7.20	7.27	7.16	7.23	7.17	7.23	0.06
HOB2	6.18	6.13	6.28	6.25	6.13	5.81	5.87	6.09	0.18
HRAO	0.68	0.38	0.40	0.43	0.42	0.22	0.35	0.41	0.14
IENG	4.37	4.39	4.28	4.27	4.32	4.28	4.25	4.31	0.05
KIRU	8.21	8.12	8.05	8.16	8.23	8.21	8.00	8.14	0.09
KOKB	3.13	3.36	3.24	3.29	2.80	3.43	2.97	3.18	0.22
KOKV	-1.52	-1.28	-1.41	-1.36	-1.87	-1.21	-1.75	-1.49	0.24
KOUG	6.55	6.68	7.55	6.97	7.73	7.16	7.81	7.21	0.51
KOUR	8.65	8.77	9.60	9.03	9.77	9.24	9.86	9.27	0.48
LCK3	-17.31	-17.20	-16.97	-17.19	-17.32	-17.69	-19.58	-17.61	0.89
LCK4	-18.03	-17.87	-17.71	-18.00	-18.02	-18.39	-20.15	-18.31	0.84
MOSE	20.55	20.64	20.50	20.52	20.56	20.49	20.50	20.54	0.05
MAS1	7.56	7.50	7.58	7.66	7.67	7.32	7.40	7.52	0.13
MATE	9.60	9.73	9.51	9.51	9.58	9.53	9.63	9.59	0.08
MEDI	18.47	18.53	18.47	18.48	18.51	18.51	18.50	18.49	0.02
MGUE	6.25	6.37	6.44	6.58	6.37	6.45	6.31	6.39	0.11
MRC1	9.43	9.30	9.36	9.28	9.35	9.32	9.53	9.37	0.08
NLIB	10.40	10.36	10.24	10.36	10.31	10.34	10.46	10.35	0.07
NNOR	7.88	7.87	7.88	7.52	7.48	7.10	7.51	7.61	0.29
NOT1	6.80	7.04	6.72	6.77	6.77	6.78	6.76	6.81	0.10
OHI3	5.64	5.11	3.79	3.53	3.61	3.61	3.53	4.12	0.88
ONS1	-15.09	-15.16	-15.26	-15.21	-15.28	-15.34	-15.33	-15.24	0.09
ONSA	1.12	1.00	0.89	0.92	0.87	0.77	0.82	0.91	0.12
OP71	5.65			5.56	5.52	5.56	5.54	5.57	0.05

	PRN	Doy	M	CTD						
	&Site	084	085	086	087	088	089	090	Mean	STD
-	PARK	4.11	4.13	4.23	3.94	3.93	3.97	3.89	4.03	0.13
	PIE1	2.83	2.86	2.90	2.85	2.81	2.81	2.91	2.85	0.04
	PTBB	7.24	7.18	7.07	7.13	7.07	7.10	7.10	7.13	0.06
	REDU	8.31	8.28	8.17	8.26	8.16	8.23	8.23	8.23	0.06
	ROAG	7.75	7.94	7.76	7.70	7.86	7.72	7.57	7.76	0.12
	SCOR	0.88	0.77	0.75	0.82	0.82	0.83	0.82	0.81	0.04
	SPT0	8.55	8.43	8.32	8.35	8.27	8.21	8.25	8.34	0.12
	STR1	4.32	4.34	4.40	4.11	4.13	4.12	4.11	4.22	0.13
	TASH	9.31	9.25	9.10	9.04	9.03	9.03	8.90	9.09	0.14
	THTG	9.34	8.64	8.14	7.38	7.49	8.06	8.09	8.16	0.67
	TID1	4.85	4.92	4.66	4.23	4.60	4.40	4.34	4.57	0.26
	TRO1	-17.97	-18.01	-18.09	-17.96	-17.96	-17.99	-18.25	-18.03	0.11
	TWTF	3.20	3.39	3.24	3.16	3.22	2.99	2.36	3.08	0.34
	USN7	9.81	9.70	9.74	9.68	9.67	9.67	9.91	9.74	0.09
	USN8	8.97	8.87	8.90	8.84	8.82	8.82	9.06	8.90	0.09
	USN9	-13.29	-13.38	-13.33	-13.38	-13.39	-13.38	-13.19	-13.34	0.07
	USUD	5.52	5.47	5.53	5.38	5.13	4.96	4.91	5.27	0.27
	VILL	6.62	6.79	6.60	6.50	6.58	6.53	6.25	6.55	0.16
	WTZR	5.88	5.87	5.77	5.79	5.90	5.83	5.87	5.84	0.05
	WTZS	6.12	6.08	6.00	6.02	6.02	6.06	6.09	6.06	0.04
	WTZZ	7.55	7.51	7.43	7.44	7.43	7.49	7.48	7.48	0.05
	YEBE	7.92	8.03	7.87	7.76	7.91	7.79	7.63	7.84	0.13
	YEL2	6.11	6.17	6.20	6.19	6.08	6.14	6.02	6.13	0.06
	ZIM3	-14.22	-14.34	-14.25	-14.35	-14.48	-14.35	-14.44	-14.35	0.10

从表中可以看出,少数测站在7天内 DCB 变化波动较大,大部分测站7天内 DCB STD 可达 0.6ns。



下图是 GPS 卫星 C1C-C2W 频间偏差的 STD 情况。

图 3.3 GPS C1C-C2W 频间偏差 7 天单天解 STD

从上图可以看出,综合使用 TH 卫星和地面站观测数据解算的 GPS 卫星 C1C-C2W 频间偏差在 7 天内的 STD 可达 0.3ns,除 G02 卫星外,其他 GPS 卫星 DCB STD 在 0.1ns 量级。TH 卫星 DCB 7 天内 STD 在 0.1ns 量级

下表是相同时间段内,综合利用 TH 低轨卫星以及地面测站解算 BDS-2 C2I-C6I 频间偏差的结果。

PRN	Doy								
&Site	084	085	086	087	088	089	090	Mean	SID
C01	-8.39	-8.48	-8.42	-8.53	-8.77	-8.61	-8.83	-8.57	0.17
C02	-2.76	-2.63	-2.57	-2.60	-2.69	-2.79	-2.75	-2.69	0.08
C03	-1.43	-1.31	-1.46	-1.51	-1.66	-1.63	-1.63	-1.52	0.13
C04	0.97	1.01	1.17	1.02	0.93	1.09	1.00	1.03	0.08
C05	-4.68	-4.60	-4.68	-5.08	-4.64	-4.58	-4.63	-4.70	0.17
C06	4.41	4.30	4.26	4.40	4.40	4.52	4.57	4.41	0.11
C07	10.53	10.58	10.53	10.60	10.48	10.41	10.68	10.55	0.09
C08	7.84	7.85	7.72	7.80	7.85	7.85	7.84	7.82	0.05
C09	3.07	2.94	2.96	3.05	3.12	3.19	3.25	3.08	0.11
C10	2.41	2.36	2.36	2.38	2.43	2.53	2.61	2.44	0.10
C11	-0.10	-0.14	-0.16	-0.20	-0.04	-0.24	-0.35	-0.18	0.10
C12	-0.64	-0.38	-0.47	-0.41	-0.66	-0.55	-0.57	-0.53	0.11
C13	-13.90	-13.99	-13.93	-13.90	-13.93	-13.87	-13.78	-13.90	0.07

表 3.5 2021 年 084-090 天 BDS-2 C2I-C6I 频间偏差解算结果

PRN	Doy	Maan	CTD						
&Site	084	085	086	087	088	089	090	Mean	SID
C14	2.66	2.49	2.70	2.99	3.17	2.67	2.59	2.75	0.24
TH-2-01	9.18	9.25	9.25	9.08	9.15	9.10	9.05	9.15	0.08
AGGO						4.45	4.44	4.45	0.01
AMC4	9.43	9.14	9.34	8.87	8.48	8.83	9.51	9.09	0.38
AREG	7.94	8.97	8.65	8.10	8.48	8.22	8.83	8.45	0.39
BOR1	42.54	42.62	42.59	42.60	42.39	42.34	42.23	42.48	0.16
BREW	20.15	19.95	19.68	19.54	19.05	19.27	19.97	19.66	0.40
BRUX	10.44	10.64	10.63	10.62	10.46	10.41	10.28	10.50	0.14
CEBR	6.18	6.26	6.22	6.29	6.28	5.98	5.48	6.10	0.29
CRO1	10.30	10.82	10.82	10.45	10.58	10.62	10.93	10.65	0.22
GODE	-0.38	-0.45	-0.74	-1.31	-0.95	-0.24	0.04	-0.58	0.46
GODN	6.79	6.79	6.46	5.68	5.94	6.71	7.10	6.50	0.51
GODS	26.61	26.45	26.26	25.71	25.95	26.71	27.00	26.38	0.45
GOP6	5.57	5.60	5.57	5.60	5.47	5.40	5.29	5.50	0.12
GOPE	43.68	43.79	43.86	43.64	43.56	43.62	43.54	43.67	0.12
HARB	6.30	6.16	6.16	6.03	6.07	5.95	5.95	6.09	0.13
HERS	6.26	6.33	6.41	6.52	6.28	6.19	5.99	6.28	0.17
HOB2	-6.26	-4.99	-6.22	-7.50	-7.29	-6.61	-5.71	-6.37	0.87
KIRU	7.26	7.30	7.24	7.22	7.21	7.08	6.87	7.17	0.15
KOKB	17.64	17.85	17.78	17.52	16.99	17.68	17.52	17.57	0.28
KOUG	6.71	7.35	7.00	6.17	6.81	6.51	7.57	6.87	0.48
KOUR	6.22	6.96	6.56	5.94	6.61	6.35	7.28	6.56	0.45
LCK3	48.37	47.94	50.01	49.89	50.79	50.42	48.63	49.44	1.11
LCK4	47.67	47.22	49.24	49.20	50.07	49.74	48.02	48.74	1.10
MAS1	8.33	7.44	7.63	8.19	7.89	7.62	7.08	7.74	0.43
MATE	30.69	30.90	30.64	30.66	30.55	30.41	30.33	30.60	0.19

PRN	Doy	N							
&Site	084	085	086	087	088	089	090	Mean	STD
MGUE	4.96	5.25	5.43	4.91	4.62	4.74	4.65	4.94	0.31
MRC1	4.20	3.96	3.86	3.17	3.55	4.15	4.50	3.91	0.44
NLIB	6.44	6.00	6.22	5.60	5.45	5.90	6.36	6.00	0.37
NNOR	5.18	5.16	5.12	4.80	4.87	4.43	4.79	4.91	0.27
OHI3	27.55	27.70	27.35	26.42	25.86	26.04	25.92	26.69	0.81
ONS1	54.32	54.52	54.47	54.32	54.10	53.96	53.91	54.23	0.24
ONSA	6.62	6.73	6.71	6.65	6.47	6.33	6.24	6.53	0.19
PARK	22.87	22.89	22.95	22.62	22.66	22.59	22.50	22.73	0.17
PIE1	35.52	34.44	35.57	35.55	34.74	35.07	35.42	35.19	0.45
PTBB	5.14	5.32	5.28	5.22	5.08	4.95	4.84	5.12	0.18
REDU	6.58	6.63	6.64	6.68	6.49	6.37	6.26	6.52	0.16
ROAG	2.66	2.55	2.87	2.84	2.90	2.70	2.24	2.68	0.23
SCOR	4.99	4.89	4.84	4.91	4.78	4.79	4.67	4.84	0.11
SPT0	6.12	6.24	6.15	6.12	5.99	5.84	5.76	6.03	0.18
STR1	21.34	21.39	21.63	21.25	21.05	21.01	20.83	21.21	0.27
TASH	8.35	8.22	8.10	7.99	8.10	8.15	8.25	8.17	0.12
THTG	5.25	4.91	4.22	4.02	4.78	3.69	3.77	4.38	0.61
TID1	6.46	6.33	3.90	5.09	6.30	6.66	6.20	5.85	1.00
USN7	5.87	5.82	5.46	4.90	5.03	5.75	6.15	5.57	0.46
USN8	4.77	4.67	4.38	3.76	3.92	4.66	5.04	4.46	0.46
USUD	2.23	2.15	2.07	1.97	1.96	2.01	1.97	2.05	0.11
VILL	7.33	7.30	7.47	7.50	7.62	7.22	6.74	7.31	0.29
WTZR	29.68	29.71	29.70	29.77	29.65	29.60	29.50	29.66	0.09
WTZS	8.79	8.95	8.95	8.92	8.79	8.72	8.62	8.82	0.13
WTZZ	19.88	20.06	20.06	19.90	19.63	19.69	19.39	19.80	0.24
WUHN	43.65	43.87	43.59	43.29	43.22	43.29	42.18	43.30	0.55

PRN	Doy	Maan	CTD						
&Site	084	085	086	087	088	089	090	Mean	51D
YEL2	5.00	5.18	5.07	4.86	4.39	4.55	4.89	4.85	0.28
ZIM3	47.32	47.44	47.38	47.20	47.20	47.38	47.10	47.29	0.13

从表中可以看出,少数测站在7天内 DCB 变化波动较大,大部分测站7天内 DCB STD 可达 0.6ns。

下图是 BDS-2 卫星 C2I-C6I 频间偏差的 STD。



图 3.4 BDS-2 C2I-C6I 频间偏差 7 天单天解 STD

从图中可以看出, BDS-2 卫星 C2I-C6I 频间偏差 7 天内的 STD 可达 0.3ns, TH 卫星 C2I-C6I 频间偏差 7 天内的 STD 在 0.1ns 量级。

3.5 本章小结

本章首先介绍了不同机构之间,卫星差分码偏差产品对比之前基准统一的方法,接着基于 TH 卫星及地面监测站数据解算了 GPS 和 BDS-2 频间偏差单天解, 进而解算了 GPS 和 BDS-2 频间偏差 7 天单天解。结果表明,基于 TH 卫星的观 测数据的 DCB 解算精度与使用地面监测站数据解算的 DCB 参数的精度相当, 并且随着地面测站数目的增多, DCB 参数的解算精度也会有所提升;综合使用 TH 卫星和地面站观测数据解算的 GPS 和 BDS-2 的 DCB 参数 STD 相当。

第四章 卫星差分码偏差产品的稳定度分析

4.1 引言

稳定的卫星 DCB 能够更好地服务于钟差解算、电离层 TEC 高精度提取和精密定位。而卫星所处空间环境发生的变化、卫星运行过程中的设备老化、不同类型卫星的更替,均可能导致卫星 DCB 参数的改变;另外,随着 DCB 产品类型的增加,有必要对近期的卫星 DCB 产品的稳定度进行评估。

本章首先在 4.2 节介绍 DCB 产品稳定度的评估方法,在 4.3 节介绍 CAS 和 DLR 的频内偏差产品的稳定度;在 4.4 节介绍 CAS 和 DLR 的频间偏差产品的稳定度。

4.2 产品稳定度评估方法

4.2.1 产品月稳定度

为了评估卫星 DCB 产品的稳定度和可靠性,通常会计算卫星 DCB 参数在 一个月内的标准差(Standard Deviation, STD),又称为月稳定度,计算公式如 下:

$$\mathbf{S}^{j,m} = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^{D^m} \left(DCB^{d,j,m} - \overline{DCB}^{j,m} \right)^2}{\mathbf{D}^m - 1}} \,\#(4-1)$$

其中, $S^{j,m}$ 是第 j 颗卫星在 m 月的 DCB 月稳定度; $DCB^{d,j,m}$ 是第 j 颗卫星在 m 月第 d 天的 DCB 估值; $\overline{DCB}^{j,m}$ 表示第 j 颗卫星 DCB 在 m 月的日估值的平均 值; D^m 表示 m 月的天数。

月稳定度值越小,说明稳定度越好;月稳定度值越大,说明稳定度越差。

4.2.2 产品平均月稳定度

为了能够更好地反映 DCB 产品的月稳定度,尽量避免月份选择导致的误差, 实验将 12 个月的卫星 DCB 月稳定度取平均,获得平均月稳定度,计算公式如下:

$$\bar{\mathbf{S}}^{j} = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} S^{j,m} \, \# (4-2)$$

其中, \bar{s}^{j} 是第j颗卫星 12 个月月稳定度的平均值。

4.3 GPS 卫星频内偏差稳定度

由于 CAS 及 DLR 的 DCB 产品中均未提供 BDS 卫星频内偏差,所以本节仅 分析 GPS 卫星的 4 种频内偏差,分别是 C1C-C1W、C2W-C2L、C2W-C2S 和 C2W-C2X,选取的时间段是 2021 年 01 月 01 日至 2021 年 12 月 31 日。

首先将 CAS 和 DLR 的产品进行基准统一, 然后将每颗卫星的月稳定度求和 之后取平均, 得到每颗卫星的平均月稳定度。

下图给出了 CAS 及 DLR 发布的 GPS 卫星频内偏差的平均月稳定度计算结果,横轴为卫星空间飞行器编号(Space Vehicle Number, SVN),纵轴为卫星频内偏差平均月稳定度,单位是纳秒。



图 4.1 CAS 及 DLR 确定的 2021 年 GPS 卫星频内偏差的平均月稳定度

从上图可以看出,C1C-C1W 频内偏差产品的平均月稳定度在 0.05ns 以内, C2W-C2L 频内偏差产品的平均月稳定度在 0.07ns 以内,C2W-C2S 频内偏差产品 的平均月稳定度在 0.05ns 以内,C2W-C2X 频内偏差产品的平均月稳定度在 0.06ns 以内;C1C-C1W 和 C2W-C2S 频内偏差产品的稳定度略优。

综上, CAS 和 DLR 提供的 4 种 GPS 卫星频内偏差产品的平均月稳定度均 在 0.07ns 以内, 两家分析中心的 C1C-C1W、C2W-C2L 和 C2W-C2S 产品稳定度 相当, DLR 的 C2W-C2X 产品稳定度略优于 CAS 的 C2W-C2X 产品稳定度。

统计两家分析中心的所有 GPS 卫星频内偏差的月稳定度平均值和月稳定度 最大值(即稳定度最差)如下表所示。

刀目乏伏	DCD 米利	平均月稳策	定度(ns)	最大月稳策	定度(ns)
上生余统	DCB 尖型	CAS	DLR	CAS	DLR
	C1C-C1W	0.016	0.018	0.034	0.047
CDG	C2W-C2L	0.021	0.019	0.063	0.068
GPS	C2W-C2S	0.019	0.018	0.045	0.045
	C2W-C2X	0.024	0.016	0.055	0.028

表 4.1 CAS 及 DLR 确定的 2021 年 GPS 卫星频内偏差的稳定度

4.4 GPS 卫星和 BDS 卫星频间偏差稳定度

基于 CAS 和 DLR 发布的卫星 DCB 产品,计算了 GPS 卫星 C1C-C2W、C1C-C5Q 频间偏差和 BDS 卫星 C2I-C6I、C2I-C7I 频间偏差的月稳定度,选取的时间 段同样是 2021 年 01 月 01 日至 2021 年 12 月 31 日。

下图给出了 GPS 卫星频间偏差的平均月稳定度计算结果。



图 4.2 CAS 及 DLR 确定的 2021 年 GPS 卫星频间偏差的平均月稳定度

从上图可以看出, CAS 及 DLR 的 GPS 卫星 C1C-C2W 频间偏差平均月稳定 度均在 0.07ns 以内, C1C-C5Q 平均月稳定度在 0.09ns 和 0.08ns 以内, C1C-C2W

频间偏差比 C1C-C5Q 频间偏差更稳定, DLR GPS 卫星频间偏差的稳定度略优于 CAS GPS 卫星频间偏差的稳定度。



下图给出了 BDS 卫星频间偏差的平均月稳定度计算结果:

图 4.3 CAS 及 DLR 确定的 2021 年 BDS 卫星频间偏差的平均月稳定度

读图可知, CAS 及 DLR 的 BDS 卫星 C2I-C6I 频间偏差平均月稳定度在 1.12ns 和 1.10ns 以内、C2I-C7I 频间偏差平均月稳定度在 0.13ns 和 0.17ns 以内。

以上结果对比以往研究结果中,2015-2016 年 C1C-C5Q 月稳定度在 0.21ns 和 0.14ns 以内、C2I-C7I 月稳定度在 0.35ns 和 0.31ns 以内,有一定的提升。这是 由于 MGEX 观测网的测站数逐年增加,在解算 DCB 时能够使用的测站数增多, 使得稳定度有所提升。

对比图 4.2 和图 4.3 可知, GPS 卫星频间偏差的稳定度优于 BDS 卫星频间 偏差的稳定度。这是因为,一方面,能够跟踪 GPS 信号的测站数目多于 BDS; 另一方面,卫星和接收机频间偏差是同时估计的,GPS 接收机 DCB 的稳定性优 于 BDS 接收机 DCB,对应的 GPS 卫星 DCB 稳定度优于 BDS 卫星 DCB。该结 论佐证了研究低轨卫星解算 DCB 的重要性:对于地面监测站覆盖有限的 BDS 而 言,可以考虑增加使用低轨卫星的观测数据解算 DCB,从而提升 DCB 的解算精 度。

此外,图 4.3 中,BDS-2 C007、C008、C009、C010、C017 和 C019 卫星 C2I-C6I 频间偏差稳定度较差,是由于该参数在 2021 年 029-050 天发生了 10ns 左右 的跳变导致相应月份的月稳定度较差,影响了稳定度。跳变的时间序列图如下图 所示。具体的分析将在第六章给出。



图 4.4 BDS-2 卫星 DCB 时间序列图

下表统计了同一种卫星 DCB 产品所有卫星月稳定度的平均值。

田見系统	DCD 米刑	平均月稳定度(ns)		
上生分红	DCD 突空	CAS	DLR	
GPS	C1C-C1W	0.016	0.018	
	C2W-C2L	0.021	0.019	
	C2W-C2S	0.019	0.018	
	C2W-C2X	0.024	0.016	
GPS	C1C-C2W	0.053	0.054	
	C1C-C5Q	0.080	0.069	
BDS	C2I-C6I	0.262	0.277	
	C2I-C7I	0.091	0.101	

表 4.2 不同类型 DCB 2021 年平均月稳定度统计

分析表中结果,可以发现: (1) GPS 卫星频内偏差的稳定度优于频间偏差, 两者 2021 年平均月稳定度分别在 0.03ns 和 0.08ns 以内; (2) GPS 卫星 L1 频率 和 L2 频率上的频内偏差,稳定度相当; (3) GPS 卫星频间偏差的稳定度优于 BDS 卫星频间偏差。

4.5 本章小结

本章首先出了产品稳定度评估的月稳定度计算方法,然后计算了 CAS 和 DLR 分析中心发布的产品中,GPS 卫星频内偏差、频间偏差和 BDS 卫星频间偏 差的月稳定度。结果表明,两家分析中心的 DCB 产品稳定度相当,GPS 卫星频 间偏差稳定度优于 BDS 卫星频间偏差。

第五章 卫星差分码偏差的长期时变特性分析

5.1 引言

不同机构在解算 DCB 时,采用着不同的电离层处理策略;同一机构在解算 频内偏差和频间偏差时,方法也不相同。为了验证电离层处理策略和解算方法是 否会对 DCB 产品造成影响,基于 CAS 和 DLR 发布的 2016-2021 年 GPS 卫星 C1C-C2W 频间偏差产品,分析其长期时变特性。

本章在 5.2 节介绍卫星频间偏差的长期时变特性,在 5.3 节分析 CAS 和 DLR 卫星频间偏差产品的周期变化,在 5.4 节给出卫星频内偏差和频间偏差的周期特 性对比。

5.2 卫星频间偏差的长期时变特性分析

CAS 分析中心采用单站电离层建模的方式处理电离层影响,DLR 分析中心则采用 GIMs 数据扣除电离层影响。

基于 CAS 和 DLR 发布的 2016-2021 年 GPS 卫星 C1C-C2W 频间偏差产品, 分析长期时变特征。选用的卫星共 28 颗, SVN 分别为: G041、G043-G045、G047、G048、G050-G053、G055-G059、G061-G073。

图 5.1 和图 5.2 是 GPS 卫星未统一基准的 C1C-C2W 频间偏差时间序列图, 图例括号内是卫星 PRN, 即卫星 SVN (PRN)。





图 5.1 GPS 卫星未统一基准的 C1C-C2W 频间偏差时间序列图 (CAS)

图 5.2 GPS 卫星未统一基准的 C1C-C2W 频间偏差时间序列图 (DLR)

从图中可以看出,大部分 GPS 卫星 DCB 有明显且相近的长期趋势项,并且 在相同的时间点出现同向的跳变,与 Zhong 等学者的研究结果一致^[20],这是由 于在分离卫星 DCB 和接收机 DCB 时,对所有卫星 DCB 施加零均值条件,以及 不同类型(Block I、Block II、Block IIA、Block IIR/IIR-M、Block IIF、Block III、 Block IIIF等,其中,前三种类型的卫星已经全部退役^[28])的 GPS 卫星更换,如 2020 年 02 月 19 日出现的跳变,是由于 G041 (G14) 卫星更换为 G077 (G14)、 G034(G18)更换为G075(G18)、G060(G23)更换为G076(G23)。

因此,应该在 DCB 分析中,使用连续运行的 GPS 卫星作为参考基准。实验 选用数据时间段较长且较为稳定的 6 颗卫星作为参考基准,然后对卫星 DCB 产 品进行逐天的基准统一。图 5.3 和图 5.4 是统一基准后的卫星 C1C-C2W 频间偏 差参数的时间序列图,可以看到,CAS 和 DLR 的 GPS 卫星 DCB 参数值均有 5ns 左右的变化。



图 5.3 GPS 卫星统一基准后的 C1C-C2W 频间偏差时间序列图 (CAS)



图 5.4 GPS 卫星统一基准后的 C1C-C2W 频间偏差时间序列图 (DLR)

5.3 卫星频间偏差的周期特性分析

在统一基准之后,进一步分析了频间偏差的周期特性,利用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT)方法求取每个频率点处的振幅。为了保证周期的 可靠性,对周期结果进行筛选,保留的最长周期的时间跨度是数据总时间跨度的 一半。

以 G043(G13)卫星 C1C-C2W 频间偏差的周期特征分析结果为例,图中, 横坐标是周期,单位是每年的周期数(Cycle per Year, CPY),纵轴为振幅 (Amplitude),单位为纳秒(ns)。



图 5.5 G043 (G13) 卫星 DCB 周期特征分析结果 (CAS)



图 5.6 G043 (G13) 卫星 DCB 周期特征分析结果 (DLR)

读图可知,G043(G13)卫星 C1C-C2W 频间偏差产品存在半周年项和周年 项。在分析的28颗卫星中,有9颗卫星 C1C-C2W 频间偏差存在半年或年周期,频谱图与G043(G13)卫星类似。

表 5.1 统计了具体的 GPS 卫星及其周期项。

SVN (PRN)	CAS 频间产品周期(cpy)	DLR 频间产品周期(cpy)		
C042 (C12)	0.98	1.07		
G043 (G13)	2.05	2.05		
G044 (G28)	0.98	1.07		
G045 (G21)	2.14	2.05		
G055 (G15)	2.05	2.05		
G058 (G12)	0.98	0.98		
G061 (G02)	0.98	1.07		
G065 (G24)	0.98	1.07		
G066 (G27)	0.98	1.07		
G072 (G08)	0.98	1.07		
	2.05	1.07		

表 5.1 CAS 及 DLR GPS 卫星 DCB 周期统计

从统计结果可以看到,G043-G045、G055、G058、G061、G065、G066、G072 卫星 C1C-C2W 频间偏差产品,存在半周年项或周年项。研究表明,TEC 也存在 半年和年周期^[16],因此,可能是在 DCB 估计时,TEC 的影响未完全去除,导致 GPS 卫星 C1C-C2W 频间偏差产品存在半年或年的周期特征。

此外,尽管 CAS 和 DLR 在估计频间偏差时,分别采用了逐测站电离层 TEC 建模和使用 GIMs 扣除电离层 TEC,但是两家的产品并没有因此存在不同的长期 时变特征。

5.4 卫星频内偏差和频间偏差的周期特性对比

不同数据分析中心之间计算频间偏差的方法不同,同一数据分析中心解算卫 星频内偏差和频间偏差的过程也不同。卫星频内偏差的解算过程中,码观测量拥 有相同的频率,组合即可扣除电离层影响;而卫星频间偏差,则需要采用电离层 TEC 建模或利用 GIMs 扣除电离层 TEC 的方法获得。实验提取了 GPS 卫星的频 内偏差和频间偏差的周期,然后进行对比,查看两者是否会有不同的周期项。

实验分析了 CAS 和 DLR 产品 GPS 卫星 C1C-C1W 频内偏差和 C1C-C2W 频

间偏差的周期,对比了两个分析中心各自的频内偏差和频间偏差周期结果。下图中所展示的周期,是FFT方法提取到该卫星 DCB 所有周期中,振幅最大的两个周期,即该卫星 DCB 周期中最为明显的两个,横轴是卫星 SVN,纵轴是周期,单位是 cpy。



图 5.7 GPS 卫星频内偏差和频间偏差周期对比(CAS)



图 5.8 GPS 卫星频内偏差和频间偏差周期对比(DLR)

从图中可以看出, CAS 的 GPS 卫星 DCB 较为明显的周期大于 1.75cpy (短于 0.57 年)或小于 1.50cpy (长于 0.67 年); DLR 的 GPS 卫星 DCB 周期结果

中,G043、G045、G055 和 G071 卫星 C1C-C2W 频间偏差存在较为明显且大于 1.50cpy 的周期,其他大于 1.50cpy 的周期是卫星 C1C-C1W 频内偏差的周期。

综上, GPS 卫星 C1C-C1W 频内偏差和 C1C-C2W 频间偏差的周期项,没有明显的分别,频内偏差存在周期的原因尚未确定。

5.5 本章小结

本章基于 CAS 和 DLR 的卫星 DCB 产品,首先分析了 GPS 卫星频间偏差的 长期时变特性,接着提取了 GPS 卫星频间偏差的周期项,最后对比了 GPS 卫星 频内偏差和频间偏差的周期特性。实验结果表明,两家分析中心不同的电离层处 理策略、同一家分析中心对频内偏差和频间偏差解算的不同过程,没有对卫星 DCB 的时变特性带来影响。

第六章 弹性功率对差分码偏差的影响分析

6.1 引言

由于 GNSS 信号传播路径长,且有着能量较弱、穿透力差和易被干扰等问题,为了保证 GNSS 高精度定位、导航、授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)服务的安全性和完好性,需要对 GNSS 系统进行增强,实现弹性 PNT 服务^[29],从而应对和适应不断变换的环境。

能够对 GNSS 系统进行增强的一个方法是在信号之间重新分配传输功率,该 过程称为弹性功率(Flex Power)。此方法可以用于对抗干扰^[4],能够有效提高军 用用户的定位导航能力^[30],但同时会对 GNSS 信号的载噪比(C/N₀)和 DCB 造 成一定的影响^[31]。因此在分析 DCB 的时变特性时需要关注弹性功率的影响。

在卫星频间偏差产品的稳定度分析中发现,BDS-2 C007、C008、C009、C010、C017 和 C019 卫星 C2I-C6I 频间偏差在 2021 年的稳定度较差,是由于该参数发生了 10ns 左右的跳变导致相应月份的月稳定度较差,影响了平均月稳定度。本章研究了跳变时间段内 BDS 卫星 C/N₀时间序列和频间偏差时间序列。

本章在 6.2 节介绍 C/N₀和信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR),在 6.3 节分析 BDS 卫星 C/N₀的时间序列短时时变情况,在 6.4 节给出 BDS 卫星 DCB 的短时时变分析。

6.2 载噪比和信噪比

信噪比(SNR)是指信号与噪声的比例,能够用于描述信号的质量^[32],可以用下式表示:

$$SNR_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{P_s}{P_N}\right) = 10\log_{10}(P_s) - 10\log_{10}(P_N) \#(6-1)$$

公式中*SNR*_{dB}表示单位为分贝(Decibel, dB)的信噪比, *P*_s表示信号的功率, *P*_N表示噪声的功率。而在 GNSS 卫星信号的测量中,由于卫星和接收机距离遥 远以及其他因素的影响,接收到噪声的功率往往比接收到所需信号的功率更高。 影响 GNSS 卫星信号接收的误差中,接收机天线导致了由加热电子电路引起的 热噪声。热噪声的计算公式如下:

$$N_T = kT \# (6-2)$$

公式中, N_T 是热噪声, T是以开尔文(Kelvins, K)为单位的热力学温度, k是玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ 。

载噪比(CNR,又称 C/N₀)定义为载波功率与接收机热噪声的比值^[33],公式如下:

$$CNR_{\rm dB} = \frac{P_c}{N_T} \# (6-3)$$

公式中, CNR_{dB} 表示载噪比, P_C 是载波的功率, N_T 是接收机热噪声。

综上, C/N₀和 SNR 的相互关系可以表达为以下公式:

$$SNR_{\rm dB} = \left(\frac{C}{N_T}\right)_{\rm dBHz} - B_{\rm dBHz} = C / N_0 - B_{\rm dBHz} \# (6-4)$$

公式中, B_{dBHz}表示调制码对应的射频带宽, 如: 对于调制在 L1 载波上的 GPS C/A 码, 其射频带宽为 B≈4MHz≈66 dBHz。

根据两者的关系公式可以看出, C/N₀的值是无线电射频带宽 B=1Hz 的 SNR 的标准化度量。假设噪声功率不变, C/N₀可以视作接收信号强度的指标。尽管由于接收机天线型号和 C/N₀估计算法的影响,不同监测站的 C/N₀之间不能直接进行比较,但是可以使用 C/N₀变化来分析卫星发射功率的变化。

6.3 BDS 卫星 C/N₀时间序列分析

实验选取了 JFNG 站和 WUH2 站的 BDS 卫星 C/N₀时间序列,分析其短时 时变情况。首先给出 2021 年 027-031 天,JFNG 站点的 BDS IGSO 卫星(C06-C10、C13、C16、C38-C40) B1I、B2I 以及 B3I 频点信号 C/N₀时间序列图。其 中 C06-C10、C13、C16 卫星是 BDS-2 的 IGSO 卫星,C38-C40 是 BDS-3 的 IGSO 卫星。图中,横坐标是时间,纵坐标是 C/N₀,单位是 dBHz。



图 6.1 JFNG 站 BDS IGSO 卫星 B1I、B2I 以及 B3I 信号 C/N₀时间序列图

从上图可以看到 BDS-2 IGSO 卫星 B3I 频点的功率变化,而 BDS-2 IGSO 卫星 B1I、B2I 以及 BDS-3 IGSO 卫星 B1I、B2I、B3I 频点的功率均未出现明显改变。

除 C06 卫星外,其他 BDS-2 IGSO 卫星均从 2021 年 029 天开始,B3I 频点的接收功率增强了 5-8dB,并且 C07 卫星提前在 028 天进行了 1 小时左右的功率 增强实验。而 C06 卫星并没有呈现其他 IGSO 卫星所表现的功率增强现象,最大 接收功率反而下降了 1dB 左右。

通常情况下, C/N₀随高度角缓慢增大或减小, 对于 30s 的采样率, 两个历元 间 C/N₀绝对差异普遍在 0.4dB。因此, 实验将短时间内(如 3min)功率增大或 减小 4dB(经验阈值),设置为异常阈值。获取阶跃增大的时刻为功率增强起始 时刻,阶跃减小的时刻为功率增强终止时刻。上述子图中绿色竖线表示功率增强 起始时刻,红色竖线表示功率增强终止时刻。统计 2021 年第 027-031 天功率增 强和终止时刻如下表所示,表中时间段的格式是(年积日,天内秒), endarc 表 示观测弧段结束时刻。

	C07	C08	C09	C10	C13	C16
	(028,13410)-					(029,27810)-
	(028,17490)					(029,endarc)
n+	(029,27810)-	(029,35010)-	(029,31410)-	(029,31410)-	(029,35310)-	(029,62040)-
町	(029,69150)	(030,10350)	(029,endarc)	(029,endarc)	(030,endarc)	(030,endarc)
[H] сп	(030,2250)-	(030,33330)-	(029,64470)-	(030,3510)-	(030,35070)-	(030,61830)-
段	(030,68850)	(030,endarc)	(030,endarc)	(030,endarc)	(031,endarc)	(031,endarc)
	(031,1830)-	(031,33090)-	(030,64230)-		(031,34830)-	(031,61590)-
	(031,68520)	(031,endarc)	(031,endarc)		(031,endarc)	(031,endarc)

表 6.1 2021 年 027-031 天 IGSO 卫星 C/No 变化起止时刻表

由于 JFNG 站未能观测 BDS 两颗 IGSO 试验星(C31 和 C56),选用 WUH2 站的观测数据进行两颗 IGSO 试验星的信号功率增强现象分析,结果如下图所示。



图 6.2 WUH2 站 BDS IGSO 试验星 B1I、B2I 以及 B3I 信号 C/N₀时间序列图

从图中可以看出,C31 卫星几乎没有 B3I 的观测数据;C56 卫星 C/N₀时间 序列中未发现功率增强的现象,在030 天部分时段的 C/N₀ 反而有所下降,在031 天恢复正常。

基于 JFNG 站进行 BDS 部分 GEO 卫星 C01-C05、C59 和 C60(数据时间段内, JFNG 站未能观测到 BDS-3 星座 GEO 卫星 C61)信号功率变化现象分析,结果如下图所示。



图 6.3 JFNG 站 BDS GEO 卫星 B11、B21 以及 B31 信号 C/N₀时间序列图

从图中可以看到,部分卫星有 1-2dB 的波动,但未发现 BDS GEO 卫星呈现显著的功率变化现象。

JFNG 站观测的部分 BDS MEO 卫星 C11、C12、C14、C23、C33、C43、C57 和 C58 的信号 C/N₀时间序列如下图所示。其中,C11、C12、C14 为 BDS-2 星座 3 颗 MEO 卫星,C23、C33、C43 为 BDS-3 星座 3 颗 MEO 卫星,C57、C58 为 BDS 试验星座 2 颗 MEO 卫星。



图 6.4 JFNG 站 BDS MEO 卫星 B1I、B2I 以及 B3I 信号 C/N₀时间序列图

从图中可以看出, BDS MEO 卫星未出现显著的功率变化现象。

综上所述,利用国内两个地面监测站(JFNG 和 WUH2)分析 2021 年 027-031 天 BDS 卫星 B1I(S2I)、B2I(S7I)以及 B3I(S7I)信号 C/N₀时间序列, 结果表明, BDS-2 IGSO 卫星 B3I 频点在 2021 年 028-031 天之间有显著的功率变 化即弹性功率过程,JFNG 站接收功率的增强量级为 5-8dB。

6.4 BDS 卫星 DCB 短时时变分析

弹性功率意味着 GNSS 信号调制方式的变化,信号调制方式会对信号相对强度以及每个信号分量的相位产生影响,表现为伪距和载波相位偏差的变化,从而影响精密定位服务。为了评估弹性功率对 GNSS 精密定位用户的影响,本节分析弹性功率期间,差分码偏差(DCB)的变化情况。



首先使用 IGS 提供的 GNSS 数据估计 BDS 的卫星 DCB,使用的测站分布如下图所示。

图 6.5 实验使用的 IGS 监测站分布图

基于上图所示监测站的观测数据,估算 2021 年 027-031 天 BDS-2 发生功率 增强的 IGSO 卫星 C07-C10、C13 和 C16 的 C6I-C2I 频间偏差的单天解,解算方 法同 DLR 频间偏差估计方法。DCB 估计结果如下图所示,横坐标是卫星 PRN, 纵坐标是 C2I-C6I 频间偏差估值,不同颜色代表不同天的 DCB 估值。



图 6.6 2021 年 027-031 天 BDS 卫星 C6I-C2I 频间偏差估值

从上图可以看出,自 029 天开始,BDS-2 IGSO 卫星 C07-C10、C13 和 C16 的 C6I-C2I 频间偏差呈现阶跃现象。统计阶跃后 030-031 天的 DCB 均值与阶跃 前 027-028 天的 DCB 均值的跳变值如下表所示。

表 6.2 2021 年 027-031 天 IGSO 卫星 C6I-C2I 频间偏差阶跃估值

	C07	C08	C09	C10	C13	C16
阶跃值 (ns)	8.569	11.892	12.172	12.403	8.362	12.076
基准修正 (ns)	10.292	13.615	13.895	14.126	10.085	13.799

从上表可以看出, DCB 跳变量级为 8-12ns。在 DCB 解算时,采用全星座卫 星 DCB 之和为 0 的约束条件,虽然参与解算的卫星数目以及 PRN 没有发生变 化,但未发生功率变化的卫星在阶跃前后的 DCB 存在 1.723ns 的差异,因此阶 跃前后的参考基准发生了变化,需考虑该基准变化的影响。

使用 JFNG 站观测数据估计 BDS 发生弹性功率过程的时间即 2021 年 027-031 天的 C6I-C2I 频间偏差单历元估值。首先构建无几何组合观测值,然后从扣除电离层影响的数据中减掉 JFNG 站的 DCB 天均值,将所得数值作为单历元卫星 DCB 估值,时间序列如下图所示。图中绿色竖线表示功率变化起始时刻,红色竖线表示功率变化终止时刻。



图 6.7 2021 年 027-031 天 BDS 卫星 C6I-C2I 频间偏差估值

从图中可以看出, DCB 的变化与前述 C/N₀ 的变化保持一致。图中卫星 DCB 估计噪声较大,主要受伪距观测噪声以及接收机 DCB 短时变化的影响。

为了削弱伪距噪声以及接收机 DCB 短时变化的影响,采用全球监测站数据估计短时(如15分钟)卫星 DCB,用于分析信号发射功率变化对 DCB 的影响。 为了削弱参考基准变化的影响,采用固定 C01 卫星 C6I-C2I 频间偏差的方法。在估计 029 天卫星及接收机 DCB 时,将 C01 卫星 DCB 固定为 028 天的天均值,



估计结果如下图所示。



从图中可以看出, DCB 增大时刻与分析 C/N₀时间序列所得的卫星功率增强 起始时刻吻合较好。

统计分析短时卫星 DCB 获取的跳变信息如下表所示。

表 6.3 短时 DCB 估计的 2021 年 027-031 天 IGSO 卫星 C6I-C2I 频间偏差跳变情况

	C07	C08	C09	C10	C13	C16
阶跃值	10.427	12.407	14.258	14.237	9.2	13.614
天内秒	27000	34200	30600	30600	34200	27000
星下点	~119°E	~117°E	~95°E	~96°E	~94°E	~112°E

从表中数据可以看出,短时 DCB 估计获取的跳变值与基于 DCB 天均值获取的跳变值吻合较好。

6.5 本章小结

本章基于 IGS 的监测站数据,分析了 BDS 卫星在 2021 年 027-031 天出现的

弹性功率过程。首先介绍了 C/N₀和 SNR 的概念,然后分析了 BDS IGSO 卫星、 GEO 卫星和 MEO 卫星的 C/N₀时间序列,获取了 BDS-2 IGSO 卫星弹性功率过 程的功率增强和终止时刻,最后分析了弹性功率过程时间段内 BDS 卫星 DCB 的 时间序列。研究结果表明,BDS-2 部分 IGSO 卫星(C07-C10、C13 和 C16)从 029 天开始,进行了 B3I 频点的功率增强,使得卫星 C6I-C2I 频间偏差增大了 9-14ns。
第七章 总结与展望

码伪距和载波相位组合观测值实现了 GNSS 时空信息的生成及其传递。差分 码偏差(Differential Code Bias, DCB)在这个过程中具有关键作用, GNSS 差分 码偏差估计和时变特性研究对于提升 GNSS 时空信息传递精度具有重要意义。

近年来,随着全球卫星导航系统的建设、发展和现代化,卫星星座逐渐复杂, GNSS 信号类型逐渐增多,DCB 产品的稳定度和时变特性情况受到众多学者的 高度关注,但大多关注两个方面,一是利用地面监测站数据进行电离层建模和分 析时,需要进行卫星和接收机 DCB 的校正;二是精密定位和授时应用中,需要 用到卫星和接收机 DCB,实现时空基准的统一。

随着低轨星座的快速部署以及低轨增强 GNSS(LeGNSS)的快速发展,利用低轨数据开展电离层分析研究已经成为研究热点,而针对北斗系统不能全球布站的局限,研究如何利用低轨星座实现北斗系统的增强同样是一个值得思考的问题。此外,弹性功率(Flex Power)是 GPS 现代化 Block IIR、Block IIF 卫星实施的应对干扰的有效措施,弹性功率不仅会影响接收机的载噪比(C/N₀)观测数据,还会对卫星 DCB 产生影响,通常的天均值 DCB 解算策略不适用于弹性功率期间的卫星 DCB 估计,从而影响精密定位精度。

为此,本课题对卫星 DCB 的稳定度和时变特性进行了研究和分析:

1、基于 TH 卫星 2021 年 084-090 天的观测数据,进行了 GPS 和 BDS-2 DCB 解算,并与 CAS 和 DLR 发布的产品进行对比,分析了低轨卫星在增强 BDS DCB 解算中的作用。

2、 基于 CAS 和 DLR 发布的 2021 年卫星 DCB 产品,评估了 GPS 卫星频 内偏差、GPS 卫星频间偏差、BDS 卫星频间偏差的稳定度。

3、 基于 CAS 和 DLR 发布的 2016-2021 年卫星 DCB 产品,分析了 GPS 卫星频内偏差和频间偏差的周期,并进行了频内偏差和频间偏差的周期项对比。

4、 基于 IGS 监测站的 GNSS 数据,分析了 2021 年 BDS 弹性功率过程以及 对 BDS 卫星 DCB 的影响。

59

通过以上的研究和分析,得到以下结论:

1、 基于 TH 卫星观测数据解算所得 DCB 参数的精度与基于地面监测站数据解算所得 DCB 参数的精度相当,使用低轨卫星+少量地面监测站可达到与全球监测布站相同的 DCB 解算效果。

2、随着 MGEX 观测网在全球的 GNSS 测站逐年增多, CAS 和 DLR 在解算 DCB 时能够使用的测站数逐渐增多,使得 2021 年卫星 DCB 产品的稳定度略优 于往年卫星 DCB 产品稳定度;此外,由于测站数目和接收机稳定性的差别,两 家分析中心 GPS 卫星频间偏差产品的稳定度优于 BDS 卫星频间偏差产品的稳定 度。

3、 CAS 和 DLR 的卫星频间偏差产品中, 部分 GPS 卫星频间偏差存在半周 年或周年项, 没有因为两家分析中心分别采用了不同的电离层 TEC 处理方法, 导致 GPS 卫星频间偏差产品存在不同的周期项; 频内偏差和频间偏差的周期项 没有明显区别。

4、BDS-2 部分 IGSO 卫星在 2021 年进行了 B3I 频点弹性功率过程,使得 卫星 C6I-C2I 频间偏差增大了 9-14ns。

虽然本课题完成了一些工作,但由于涉猎知识的局限,仍然有许多需要深入 研究的工作:

1、 尝试使用 TH 卫星之外其他低轨卫星的观测数据解算 DCB,对比 BDS 不同类型卫星 DCB 的解算精度。

2、卫星频内偏差存在周期项的原因有待进一步的分析和研究。

3、目前只对 GPS 卫星 DCB 的周期进行了提取和分析,其他导航系统的卫星 DCB 是否也存在半周年或周年项仍需实验探究。

4、 基于数据时间长度对卫星 DCB 周期分析结果进行了可靠性筛选,无法 检验卫星 DCB 是否同样存在电离层 TEC 存在的 11 周年变化,有待时间跨度更 长的数据进行研究分析。

5、 虽然使用 C/N₀ 数据探测到 BDS-2 IGSO 卫星的功率增强,但是卫星功率增强的地理分布及量化特征仍需进一步分析。

60

参考文献

[1] Wilson B D, Mannucci A J. Instrumental biases in ionospheric measurement derived from GPS data[J]. Proceedings of Ion Gps, 1993.

[2] Zhang Y, Kubo N, Chen J, et al. Calibration and analysis of BDS receiver-dependent code biases[J]. Journal of Geodesy, 2021, 95(4): 43.

[3] 聂欣, 郑晋军, 范本尧. 低轨卫星导航系统技术发展研究[J]. 航天器工程, 2022, 31(01): 116-124.

[4] Esenbuğa Ö G, Hauschild A. Impact of flex power on GPS Block IIF differential code biases[J].GPS Solutions, 2020, 24(4): 91.

[5] Gao Y, Lahaye F, Heroux P, et al. Modeling and estimation of C1–P1 bias in GPS receivers[J]. Journal of Geodesy, 2001, 74(9): 621-626.

[6] Schaer S. Overview of GNSS biases, IGS Workshop on GNSS Biases 2012[J], 2012.

[7] 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.

[8] 吴晓莉, 平劲松, 刘利, 等. 区域卫星导航系统硬件延迟解算[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(10): 1218-1221.

[9] 谢益炳,陈俊平,伍吉仓,等.不同约束条件对电离层电子含量和硬件延迟的影响[J].武 汉大学学报(信息科学版),2014,39(07):799-803.

[10] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps[J]. NAVIGATION, 2014, 61(3): 191-201.

[11] 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.

[12] Wang N, Yuan Y, Li Z, et al. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations[J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(3): 209-228.

[13] Montenbruck O, Hauschild A. Code Biases in Multi-GNSS Point Positioning[M]. 2013.

[14] 张宝成, 袁运斌, 欧吉坤. GPS 接收机仪器偏差的短期时变特征提取与建模[J]. 地球物理学报, 2016, 59(01): 101-115.

[15] 谷世铭, 党亚民, 王虎, 等. 北斗差分码偏差改正对单点定位的影响[J]. 测绘科学, 2020, 45(10): 10-15.

[16] 王宁波. GNSS 差分码偏差处理方法及全球广播电离层模型研究[D]. 中国科学院大学, 2016.

[17] 任晓东. 多系统 GNSS 电离层 TEC 高精度建模及差分码偏差精确估计[D]. 武汉大学, 2017.

[18] Zhang Y, Chen J, Gong X, et al. The update of BDS-2 TGD and its impact on positioning[J].Advances in Space Research, 2020, 65(11): 2645-2661.

[19] 黄良珂, 陈军, 李琛, 等. 利用 IGS 电离层格网产品分析电离层峰值变化特性[J]. 科学 技术与工程, 2018, 18(18): 212-217.

[20] Zhong J, Lei J, Dou X, et al. Is the long-term variation of the estimated GPS differential code biases associated with ionospheric variability?[J]. GPS Solutions, 2016, 20(3): 313-319.

[21] 杨海彦. iGMAS 观测质量改进及电离层高精度监测研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2016.

[22] Byungkyu C, Donghyo S, Jeong L S. Reply to Comment on Choi et al. Correlation between Ionospheric TEC and the DCB Stability of GNSS Receivers from 2014 to 2016. Remote Sens. 2019, 11, 2657[J]. Remote Sensing, 2020, 12(21).

[23] Steigenberger P, Thölert S, Montenbruck O. Flex power on GPS block IIR-M and IIF[J]. GPS Solutions, 2019, 23(1): 8.

[24] 韩奇,朱克家,付钰,等. 美国打击叙利亚期间 GPS 信号监测评估[J]. 导航定位学报, 2019,7(03): 7-10.

[25] 刘苗苗, 焦文海, 贾小林. 美伊冲突中的 GPS 信号增强分析[J]. 全球定位系统, 2020, 45(01): 31-36.

[26] 聂文锋. 多系统 GNSS 全球电离层监测及差分码偏差统一处理[D]. 山东大学, 2019.
[27] 楼良盛, 刘志铭, 张昊, 等. 天绘二号卫星工程设计与实现[J]. 测绘学报, 2020, 49(10):
1252-1264.

[28] 刘天雄,周鸿伟,聂欣,等.全球卫星导航系统发展方向研究[J].航天器工程,2021, 30(02):96-107.

[29] 杨元喜. 弹性 PNT 基本框架[J]. 测绘学报, 2018, 47(07): 893-898.

[30] Thoelert S, Steigenberger P, Montenbruck O, et al. Signal analysis of the first GPS III satellite[J]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 92.

[31] Esenbuğa Ö, Hauschild A, Steigenberger P. Impact of GPS Flex Power on Differential Code Bias Estimation for Block IIR-M and IIF Satellites[M]. 2020.

[32] 孙小荣, 张书毕, 吴继忠, 等. 基于 SNR 的 GPS-IR 技术机理分析[J]. 地球科学进展, 2019, 34(02): 156-163.

[33] Falletti E, Pini M, Presti L L. Low Complexity Carrier-to-Noise Ratio Estimators for GNSS Digital Receivers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(1): 420-437.

致 谢

2019 年秋天,我进入上海天文台攻读硕士研究生。三年时间慢慢流走,转眼间,已是浅夏如歌,却顾所来径,苍苍横翠微。

一朝沐杏雨,一生念师恩。非常幸运能够成为陈俊平老师、王彬老师的学生, 非常感谢两位老师在我整个硕士研究生阶段的悉心指导。从最开始的基础知识巩 固,到小论文的定题、实验、总结、撰写和投稿,多次学术会议的交流学习,每 周组会的交流,再到硕士毕业论文的选题、规划、撰写、修订和定稿,两位老师 严谨的学术精神和认真细致的指导,让我不断学习不断成长。非常感谢陈老师和 王老师在指导我的学业之外,关心着我的生活状态,叮嘱我在学习之余适度放松 身心、锻炼身体,每次交流都是春风和气,让我倍受鼓舞备感关怀。在硕士三年 级临近毕业时,恰逢上海疫情,感谢两位导师在疫情期间给我的帮助和关心,两 位老师无私的付出和帮助,让我能够顺利地完成毕业论文。在此谨向两位导师致 以最真挚的谢意与祝福!

非常感谢课题组张益泽老师给予的学术指导以及带给我们的日常邀请报告, 非常感谢课题组谭伟杰老师教我处理财务事项和关心疫情下的生活。非常感谢分 享答辩经验的柳培钊师兄,非常感谢青岛参会时相伴的刘姣师姐,非常感谢教我 使用各类学习软件、解答了实验疑惑、给予了很多帮助的于超师兄,非常感谢教 我使用和配置 Net_Diff 的宋子远师兄,非常感谢撰写了"学习记录"博客、开设 论文撰写课堂的丁君生师兄,非常感谢教我使用 Ubuntu、帮我提升 Matlab 画图 技能的王茹圆师姐,非常感谢认识时间最久、时常鼓励和帮助我的唐文杰同学。 非常感谢每一位课题组成员给予的温暖和关照,想念和大家一起筹备和举办 CPGPS2020、一起参加学术会议、一起参加天文台各类活动的时光。山水有相逢, 望君多珍重。

非常感谢研究生部的马金老师和储怡老师,感谢你们在研究生学习生活里的 照顾和付出;非常感谢团委左文文老师在学生工作方面的引领,每次交流后都收 获满满。

64

非常感谢李朵朵师姐在我研三期间的鼓励和陪伴,感谢你愿意做我的答辩秘书,和我一起完成硕士毕业论文的答辩;非常感谢苏珂师兄在我开题答辩时给予的鼓励;非常感谢靳许磊师兄分享 CPGPS 报告的 PPT;非常感谢焦国强师兄在我完善论文时的指点。

非常感谢王茹圆师姐,与你同办公室、同宿舍期间,我学到了很多;非常感谢已经毕业的室友 18 级硕士研究生刘晓飞师姐对我的关心;非常感谢在疫情期间相伴的室友 20 级硕士研究生杨思睿师妹。

非常感谢 19 级朱晓娜、黄湘宁、井鑫、罗秋怡、梁悦、马文骁、汪爱玲、 王蕾、朱旭娇、王志超、常捷、邵瑞、陈修宇、麦晓枫、杨帅、柴溢、穆子豪、 王智韬等同学在天文台生活中给我的帮助和关心,想念我们一起在北京雁栖湖度 过的日子。

再次感谢陈俊平老师、王彬老师,张益泽老师、谭伟杰老师和同门师兄师姐 对我论文写作的指导和生活的关心,感谢疫情期间每天在微信群里统计各类信息 的研究生部马金老师和储怡老师,感谢住进台里保障疫情期间学习生活的老师们、 后勤叔叔阿姨们,感谢通知核酸检测、帮忙接水传递物资的志愿者们,感谢风里 雨里来为我们做核酸检测的医护人员,感谢居家办公坚持保障我们学习和生活的 各个部门的老师们,感谢在疫情期间为我提供安稳学习环境和物资保障的上海天 文台。

非常感谢我的妹妹和爸爸妈妈,家庭的温暖伴随着我前行的脚步,让我的每 一个选择都拥有理解与支持。感谢表姐一家带给爸爸妈妈的陪伴与欢乐。

回首望去,硕士研究生的时光里,有许多美好的印迹在闪闪发光。心中感慨 万千,感谢万千,感恩万千。

心有万千感恩,借此只言片语,感恩两位恩师给予的教导和帮助,感恩在上 海天文台每一个美好的遇见,真诚地祝愿大家幸福平安!

非常感谢评阅本文的专家学者们,感谢您给予本文的宝贵意见和建议!

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

2015年09月-2019年06月,南京师范大学,测绘工程,获工学学士学位。 2019年09月-2022年06月,中国科学院上海天文台,天体测量与天体力学,

硕士研究生。

获奖情况:

2020年05月 中国科学院大学"优秀共青团员"

2020年07月 中国科学院大学"三好学生"

已发表(或正式接受)的学术论文:

崔洁,陈俊平,王彬,等. 基于 CAS 和 DLR 产品的卫星 DCB 特性分析[J]. 天文学进展(已接受)