doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.05.006

# iGMAS 分析中心产品一致性分析及其应用研究

苗 伟<sup>1,2</sup>,王潜心<sup>1,2</sup>,胡 超<sup>1,2</sup>,王泽杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室,徐州 221116;2. 中国矿业大学环境与测绘学院,徐州 221116)

摘 要:通过比较不同分析中心提供的精密轨道与钟差产品发现,不同分析中心的轨道和钟差表 现出明显差异,并且轨道径向和钟差的相对偏差存在很强的相关性和周期特性。经过数据分析, BDS、GPS、GLONASS的轨道径向和钟差相对偏差具有12h和24h周期项,而Galileo具有12h周 期项。因此,提出了一种新的钟差拟合及加权综合方法,通过建立多项式+不同周期项模型对钟 差进行拟合求得残差序列,利用残差序列对不同分析中心产品的钟差值进行定权,并将加权均值 作为钟差综合值。通过与ISC 钟差对比发现,提出的钟差综合模型可以明显提高部分分析中心产 品的钟差精度,并优化 iGMAS 分析中心钟差产品的一致性。

关键词:iGMAS;轨道;钟差;相关性;一致性

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)05-0045-13



# Research on Consistency Analysis and Application for Products from iGMAS Analysis Center

MIAO Wei<sup>1,2</sup>, WANG Qian-xin<sup>1,2</sup>, HU Chao<sup>1,2</sup>, WANG Ze-jie<sup>1,2</sup>

 Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring of MNR, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Environment Science & Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract**: By comparing the precision orbit and clock offsets products provided by different analysis centers, it is found that the orbits and clock offsets of different analysis centers are obviously different, and the relative deviation of orbit radial and clock offsets has strong correlation and periodic characteristics. Through the data analysis, the relative deviation of orbit radial and clock difference of BDS, GPS and GLONASS has 12h and 24h cycle terms, while Galileo has 12h cycle terms. To solve the above problem, this paper proposes a new method to fit the clock offsets by establishing a polynomial + different periodic term model. The residual sequence which is used to weight the clock offsets of different analysis centers is resolved. So the weighted mean value of the two analysis centers is taken as the combination value of clock offsets. By comparing with ISC clock, the proposed combination clock model can significantly improve the accuracy of clock offsets products, and optimize the consistency of different analysis centers' clock offsets products.

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX20\_0813);

中国矿业大学未来杰出人才助力计划项目(2020 WLJCRCZL054)

**收稿日期**:2020-03-21;修订日期:2020-04-13

作者简介:苗伟(1994-),男,硕士研究生,主要从事 GNSS 数据处理研究。E-mail: ts18160098p31 @cumt.edu.cn 通信作者:王潜心(1980-),男,博士,教授,主要从事 GNSS 高精度数据处理研究。E-mail: wqx@cumt.edu.cn

Key words: iGMAS; Orbit; Clock offset; Relevance; Consistency

### 0 引言

随着全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)不断壮大,高精度 GNSS 已广泛应用于地球科学研究和社会生产活动。立 足于我国北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS), 中国从 2012 年正式启动 国际 GNSS 监测评估系统 (International GNSS Monito-ring & Assessment System, iGMAS) 建 设。该系统的主要任务是建立 BDS/GPS/GLO-NASS/Galileo 导航卫星全弧段、多重覆盖的全球近 实时跟踪网,以及具备数据采集、存储、分析、管理 和发布等功能的信息服务平台,对 GNSS 的运行状 况和主要性能指标进行监测和评估,生成高精度精 密星历、卫星钟差、地球定向参数、跟踪站坐标和速 率、全球电离层延迟模型和 GNSS 完好性等事后产 品,支持卫星导航技术试验和监测评估,服务于科 学研究和各类应用[1]。

目前,iGMAS已建成13家分析中心,各分析中 心功能相同,可独立开展工作,且均可为 iGMAS 提 供各类 GNSS 产品。文献[2]指出,各分析中心提 供的最终轨道和钟差产品相对于 MGEX 轨道和钟 差产品的精度,如表1所示。

## 表 1 iGMAS 分析中心最终轨道和钟差产品相对于 MGEX 最终轨道和钟差产品的精度

 
 Tab. 1
 Precision of the final orbit and clock offsets products of iGMAS analysis center relative to that of MGEX

产品类别/卫星导航系统	轨道产品/cm	钟差产品/ns
GPS	<3	0.1~0.4
GLONASS	<8	0.1~0.5
Galileo	<10	0.2~1
BDS(IGSO/MEO)	<15	0.2~0.8
BDS(GEO)	<140	0.4~0.9

由表1分析可得,各分析中心 BDS 的轨道和钟 差产品精度略低于 GPS/GLONASS/Galileo 轨道和 钟差产品的精度。近年来,国内学者一直致力于研究 提高 BDS 轨道和钟差精度的方法。Qianxin Wang 指 出,利用 BDS-2/BDS-3 综合精密时钟偏移量进行超 快速定轨的方法,可以使 BDS-2/BDS-3 观测轨道的 精度分别提高 9.2%和 5.0%,预测轨道的精度可提 高到 82.2%<sup>[3]</sup>;Chao Hu 和 Qianxin Wang 等提出的 基于 BDS-2 和 BDS-3 联合估计的 BDS 卫星超快速时 钟偏移预测改进模型,在预测时间为 18h 内时,BDS-2 的时钟 偏移量 预测 精度提高了 30.7%~47.3%, BDS-3 的时钟 偏移量提高了 49.9%~59.3%<sup>[4]</sup>; Qianxin Wang 和 Chao Hu 等提出的基于精度因子的 全球导航卫星观测系统超快速轨道修正方法,对于在 观测轨道的最后 3h,由于观测不足而产生的观测超 快速轨道误差可以修正 12%~22%<sup>[5]</sup>。

国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS) 是国际大地测量协会(International Association of Geodesy, IAG)为支持大地测量和地 球动力学研究于1993年组建的一个国际协作组织, 共有12个分析中心为其提供轨道和钟差等产品[6]。 多年来,国内外许多学者针对 IGS 不同分析中心轨 道和钟差产品的一致性做了很多研究。Jan Kouba 和 Tim Spronger 提出了一种事后钟差综合方法,该 方法首先进行钟差与轨道、钟差与站坐标产品间的 一致性改正,之后消除各个分析中心钟差间的系统 偏差,实验结果表明,钟差产品与轨道产品、ERP产 品、站坐标产品间的一致性达到毫米级<sup>[7]</sup>;Ouba J 和 Mireault Y 等使用 IGS 综合产品进行了精密单 点定位实验,详细分析和阐述了定位过程中涉及的 各项误差改正模型,定位结果表明,该综合产品可 以获得 cm 级的定位精度<sup>[8]</sup>; Steigenberger P 和 Hugentobler U 等通过分析 4 个多 GNSS 实验项目 (Multi-GNSS Experiment, MGEX)分析中心的 Galileo 产品在 20 周内的轨道和时钟质量发现:比 较各个分析中心的轨道,具有 5~30cm 的一致性, 相邻 2 天轨道不连续误差为 4~28cm, 而其拟合均 方根值在 1~7cm 之间<sup>[9]</sup>;魏娜分析了 IGS 各类产 品间的一致性,并指出随着绝对天线相位中心模型 的引入, IGS 框架和国际地球参考框架 (International Terrestrial reference Frame, ITRF)的尺度一 致性具有显著提高<sup>[10]</sup>;陈俊平通过对比 IGS 不同数 据分析中心提供的 GNSS 精密时空产品发现,各分 析中心的轨道和钟差存在明显差异,并且轨道和钟 差的相对偏差存在很强的相关性——呈现负相关 特性。类比 IGS, iGMAS 不同分析中心之间可能也 存在产品一致性问题<sup>[11]</sup>。

本文通过对 iGMAS 多家产品进行分析比较发现, iGMAS 不同分析中心之间确实存在产品一致

性问题,不同分析中心轨道径向和钟差相对偏差呈 现强相关,并且还具有一定的周期特性。基于以上 发现,本文主要研究了以下几个方面:1)结合具体 数据分析了 iGMAS 不同分析中心最终轨道和钟差 的相关特性,并通过求解相关系数加以说明;2)对不 同分析中心最终钟差的相对偏差进行周期特性分析, 寻找主周期;3)根据上面提取的周期,对各个分析中 心的最终钟差进行建模拟合,求得原始钟差与拟合值 的残差,以求得的残差对不同分析中心的钟差进行定 权,最后将求得的各分析中心的钟差加权平均值作为 钟差综合值。结果表明,本文提出的钟差综合方法, 可以提高不同分析中心钟差的一致性。

#### 1 轨道与钟差相关性分析

iGMAS目前已建成 13 家数据分析中心,每个分析中心都在为其提供轨道和钟差等产品。为分析不同分析中心轨道和钟差的相关性,本文选取 iGMAS 5 家数据分析中心——中国科学院测量与 地球物理研究所(Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, IGG)、中国 人民解放军信息工程大学(Information Engineering University, LSN)、中国科学院国家授时中心 (National Time Service Center, Chinese Academy Of Sciences, NTS)、中国科学院上海天文台(Shanghai Astronomical Observatory, SHAO)以及武汉大 学(Wuhan University, WHU)提供的 2019 年 9 月 18 日~20 日这 3 天的最终轨道和钟差产品作为轨 道与钟差相关性分析的数据。

基于以上选取的数据,分别对比 IGG&WHU、 LSN&WHU、NTS&WHU、SHA&WHU 的轨道 与钟差。以 IGG&WHU 为例具体介绍了对比方 案:首先将2家分析中心相同历元的轨道径向和钟 差分别作差,得到轨道径向和钟差直接差值,为了 消除不同分析中心之间因参考基准不同带来的系 统偏差,每个导航系统各选取1颗卫星作为参考卫 星,接着将第一步求得的直接差值与参考星的直接 差值相减,得到2家分析中心每颗卫星轨道径向和 钟差的相对偏差;以相同的方法求得 LSN&WHU、 NTS& WHU、SHA&WHU 的每颗卫星轨道径向 和钟差的相对偏差。比较分析发现,不同分析中心 提供的最终轨道以及钟差在去掉系统性偏差后仍 然存在明显的不一致。每家分析中心每个卫星系 统选取了1颗卫星作为示例,其他卫星类似。对比 结果如图 1~图 4 所示。



图 1 IGG/WHU 卫星轨道径向以及钟差的相对偏差

Fig. 1 Relative deviations of satellite orbit radial and clock offsets between IGG and WHU products



图 2 LSN/WHU 卫星轨道径向以及钟差的相对偏差

Fig. 2 Relative deviations of satellite orbit radial and clock offsets between LSN and WHU products



图 3 NTS/WHU 卫星轨道径向以及钟差的相对偏差

Fig. 3 Relative deviations of satellite orbit radial and clock offsets between NTS and WHU products



图 4 SHA/WHU 卫星轨道径向以及钟差的相对偏差 Fig. 4 Relative deviations of satellite orbit radial and clock offsets between SHA and WHU products

从图 1~图 4 可以发现,5 家分析中心的轨道和 钟差均存在周期特性,各家分析中心的 BDS、 Galileo、GPS、GLONASS 卫星轨道径向最大偏差以 及钟差最大偏差如表 2 所示。从表 2 中可以发现, 除了 IGG&WHU 的 BDS 外,轨道相对偏差均小于 钟差相对偏差,这可能是因为轨道径向误差被钟差吸 收了所导致的。此外,从图中还可以看出,各家分析 中心的轨道径向相对偏差与钟差相对偏差呈现出负 相关,其中 BDS 和 Galileo 的负相关现象比较明显, GPS 和 GLONASS 相对较弱。以 IGG 和 WHU 的轨 道径向和钟差差值为例,求取二者的相关系数,以轨 横坐标,相关系数如图 5 所示。从图 5 可以看出, BDS 和 Galileo 的负相关现象比较明显,GPS 和 GLONASS 相对较弱,仅呈现一定的相关性。根据式 (1)计算可得 BDS、Galileo、GPS、GLONASS 卫星的轨 道径向相对偏差与钟差相对偏差相关系数分别达到 -0.940、-0.931、-0.576、-0.722,与图 5 反应的 信息一致。

$$r(\text{clk},\text{orb}) = \frac{Cov(\text{clk},\text{orb})}{\sqrt{Var[\text{clk}]Var[\text{orb}]}}$$
(1)

cm

式中,clk 表示钟差相对偏差差值;orb 表示轨 道相对偏差差值。

表 2	各家分析中心	BDS, Galileo.	GPS, GLONASS	卫星轨道径向	最大偏差以及钟	<b>Þ差最大偏差</b>
-----	--------	---------------	--------------	--------	---------	---------------

Tab. 2 Maximum radial deviation and clock offsets deviation of BDS, Galileo, GPS and GLONASS satellites from each analysis center

								cm
	IGG&WHU		LSN&WHU		NTS&WHU		SHA& WHU	
	轨道差值	钟差差值	轨道差值	钟差差值	轨道差值	钟差差值	轨道差值	钟差差值
BDS	87	76	64	66	21	58	24	46
Galileo	21	26	32	53	16	21	32	17
GPS	5	24	4	6	6	16	3	30
GLONASS	8	18	6	9	6	18	4	17



图 5 IGG&WHU 卫星轨道径向以及钟差的相对偏差及其相关性

Fig. 5 Relative deviations of satellite orbit radial and clock offsets between SHA and WHU products and their correlations

由以上实验分析可知,各家分析中心除了轨道 和钟差解算基准不同外,各家的解算模型也有所不 同;但由于解算模型不同而产生的模型误差,轨道 径向误差与钟差误差可以相互抵消一部分。

## 2 顾及相关性的钟差产品分析

卫星轨道和钟差高度相关,尤其是轨道径向误 差会被卫星钟差所吸收,因此在钟差数据中会有一 定的周期特性<sup>[12]</sup>,这与第1节的实验现象相符。由 于实际情况下的 GNSS 卫星钟差的周期约为半个 恒星日,采用采样长度为1天的钟差数据进行频谱 分析时,数据长度相对较短,难以得到准确的频 率<sup>[2]</sup>。故本节取 iGMAS 5 家数据分析中心(IGG、 LSN、NTS、SHA、WHU)提供的 2019 年 7 月 5 日 ~8 月 5 日这 1 个月的最终精密钟差数据,采用第 1 节相同的方法求取各家分析中心的钟差相对偏差, 并利用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)频谱分析方法对其进行周期特性分析<sup>[13]</sup>,基 于相对偏差的主要频率,分析了不同分析中心钟差 相对偏差的周期特性<sup>[14-15]</sup>。在采用 FFT 将信号从 时间域转换到频率域的过程中,原始信号被拆分为 多个正余弦信号。在分解出的正余弦信号中,每个 信号都具有自己独特的频率,可以通过功率谱函数 来体现一个信号在原始信号中的作用,信号的功率 谱越大则表明该信号在原始信号中的作用越大,否 则越小<sup>[2]</sup>。根据频谱分析结果中振幅的大小来选择 钟差数据中的显著周期项。以 SHA 与 WHU 这 2 家分析中心提供的卫星钟差的相对偏差为例,BDS、 Galileo、GPS、GLONASS 四系统选取的参考星分别 为 C06、E11、G01、R05,主频率分析结果如图 6 所示。



图 6 SHA/WHU 卫星钟差相对偏差频谱分析

Fig. 6 Spectrum analysis of satellite clock offsets's relative deviation between SHA and WHU

从图 6 可以看出,BDS、GPS、GLONASS 有明显的 12h 和 24h 周期项,Galileo 有明显的 12h 周期项,但 24h 周期项不明显;除此之外,BDS 还有 48h、8h和 6h 周期项,GLONASS 还有明显的 8h 周期项。四系统钟差相对偏差主周期项存在差异,BDS和 Galileo 的主周期项均约为 12h,而 GPS和 GLO-NASS 的主周期项约为 24h。对 iGMAS 其他分析中心精密钟差相对偏差的周期项分析结果与上述类似,这与第 1 节的实验现象相符。

基于上面钟差周期特性的分析结果,本文提出 了构建多项式加周期项拟合模型对不同分析中心 提供的最终精密钟差产品进行拟合,求得原始钟差 值与拟合值的残差值,接着利用残差值进行定权, 从而求得2家分析中心的加权均值作为钟差综合 值,以此提高不同分析中心钟差产品的一致性。具 体实施方案可分为以下三种。

方案一:

1)采用一次多项式加1个周期对分析中心的原 始钟差产品进行拟合得到拟合值,求取原始钟差与 拟合值的残差值,并利用残差值进行定权,求取2家 分析中心的加权平均值作为钟差综合值;

2)采用一次多项式加2个周期对分析中心的原 始钟差产品进行拟合得到拟合值,求取原始钟差与 拟合值的残差值,并利用残差值进行定权,求取2家 分析中心的加权平均值作为钟差综合值;

3)采用一次多项式加3个周期对分析中心的原始钟差产品进行拟合得到拟合值,求取原始钟差与 拟合值的残差值,并利用残差值进行定权,求取2家 分析中心的加权平均值作为钟差综合值;

4)采用一次多项式加4个周期对分析中心的原 始钟差产品进行拟合得到拟合值,求取原始钟差与 拟合值的残差值,并利用残差值进行定权,求取2家 分析中心的加权平均值作为钟差综合值。

方案二:与方案一形式类似,将一次多项式替 换为二次多项式后,分别加1~4个周期对钟差产品 进行综合。

方案三:与方案一形式类似,将一次多项式替 换为三次多项式后,分别加1~4个周期对钟差产品 进行综合。

三种实验方案具体流程如图7所示。

基于以上提出的三种方案,本文选取了中国矿业 大学(China University of Mining and Technology, CUM)、NTS、SHA 以及 WHU 这4家分析中心提供 的2019年7月21日当天的最终钟差产品进行产品 综合,分别将 CUM、NTS、SHA 的钟差产品与 WHU 的钟差产品进行综合。以 ISC 提供的钟差产品为基 准,计算各家分析中心的原始钟差值和综合钟差值相 对于 ISC 钟差的相对偏差以及相对偏差的标准偏差 (Standard Deviation, STD)值, BDS、Galileo、GPS、 GLONASS 这 4 个系统选取的参考星分别为 C06、 E11、G01、R05。以 SHA& WHU 为示例,结果如图 8 和表 3 所示,STD 值越小,说明钟差综合精度越好。



Fig. 7 Experimental scheme flow chart



图 8 SHA&WHU 综合钟差 STD 值

Fig. 8 STD value of SHA &WHU combination clock offsets

表 3 SHA&WHU 综合钟差 STD 值

 Tab. 3
 STD value of SHA & WHU combination clock offsets

	方案一			方案二			方案三					
	1个周期	2个周期	3个周期	4个周期	1个周期	2个周期	3个周期	4个周期	1个周期	2个周期	3个周期	4个周期
С	0.2612	0.2608	0.2615	0.2609	0.2611	0.2611	0.2617	0.2609	0.2611	0.2611	0.2632	0.2611
Е	0.0579	0.0582	0.0607	0.0587	0.0573	0.0584	0.0604	0.0583	0.0578	0.0575	0.0584	0.0579
G	0.1038	0.1042	0.1048	0.1035	0.1039	0.1039	0.1046	0.1039	0.1039	0.1039	0.1063	0.1046
R	0.0973	0.0966	0.0963	0.0972	0.0967	0.0965	0.0968	0.0965	0.0972	0.0965	0.0971	0.0977

由图 8 可以明显地看出,使 BDS、Galileo、GPS、 GLONASS 这 4 个系统 STD 值最小的方案各不相 同,对于 BDS,采用一次多项式+2 个周期的综合模 型得到的综合钟差精度最好;而对于 Galileo、GPS、 GLONASS,则分别采用二次多项式+1 个周期、一 次多项式+4 个周期、一次多项式+3 个周期综合 模型得到的综合钟差相对偏差的 STD 值最小。结 合图 6,对 4 个系统卫星钟差进行谱分析发现,4 个 系统卫星钟差的主周期不尽相同,故引起不同系统 需要不同综合模型现象的原因可能是因为 BDS、 Galileo、GPS、GLONASS 主周期不同导致的。除了 4 个导航系统采用的模型不同外,CUM&WHU 以 及 NTS&WHU 采用的综合模型也不尽相同,下面 将详细介绍各家分析中心采用的综合模型。

依然以 SHA& WHU 钟差综合为例,由以上分 析可知,SHA& WHU 钟差综合根据不同的卫星系 统采用不同的模型,如表 4 所示。

	表 4	实验模	型选择	
Гаb. 4	Expe	rimental	model	selection

卫星 系统	BDS	Galileo	GPS	GLONASS
模型	一次多项式+	二次多项式+	一次多项式+	一次多项式+
	2个周期	1个周期	4 个周期	3个周期

选取 2019 年 8 月 10 日当天的最终钟差产品进 行产品综合,以 ISC 提供的钟差产品为基准,计算 各家分析中心的钟差和综合钟差相对于 ISC 钟差 的相对偏差。由于原始钟差中存在跳变现象,对钟 差综合带来了不好的影响,故本文通过设置阈值来 剔除发生跳变的历元钟差,然后用前后历元钟差的 平均值代替剔除的历元钟差。剔除函数如式(2) *difclk*<sub>i</sub> =

$$\begin{cases} difclk_{i}, difclk_{i} - difclk_{i-1} < \delta \\ \frac{difclk_{i-1} + difclk_{i+1}}{2}, difclk_{i} - difclk_{i-1} \ge \delta \end{cases}$$
(2)

式中:  $difclk_{i-1}$ 、 $difclk_i$ 、 $difclk_{i+1}$ 分别表示某 一卫星在第i-1、i+1历元的钟差相对偏差;  $\delta$ 表示设置的阈值,此处设置为 0.5ns。原始钟差序 列经过处理后,即可进行钟差综合,综合方法前文 已经介绍,在此不再赘述。

综合结果如图 9~图 12 所示。图 9~图 12 中, 蓝色、红色、黄色实线分别代表综合钟差与 ISC 钟 差、SHA 与 ISC 钟差、WHU 与 ISC 钟差的相对偏 差,BDS、Galileo、GPS、GLONASS 这 4 个系统选取 的参考星分别为 C06、E01、G01、R05。由图 9~图 12 可以看出,各系统综合钟差相对偏差值一直处于 SHA 和 WHU 中间,说明本文提出的钟差综合策 略能够很好地对不同分析中心提供的钟差产品进 行综合,以提高不同分析中心钟差产品的一致性。

进一步分析 SHA& WHU、CUM& WHU、NTS& WHU 钟差综合的相对偏差 STD 值,如图 13 所示。

由图 13 可以看出,各分析中心钟差综合相对偏差的 STD 值一直处于各自提供的钟差相对偏差 STD 值中间。以 C11 卫星为例,SHA&WHU 的综合钟差、SHA 和 WHU 的 STD 值分别为 0.165ns、0.262ns、0.189ns; CUM&WHU 的综合钟差、CUM 和 WHU 的 STD 值分别为 3.031ns、3.121ns、2.997ns;NTS&WHU 的综合钟差、CUM 和 WHU 的 STD 值分别为 3.120ns、3.241ns、2.998ns。这与上文 实验现象相符,说明本文提出的钟差综合策略可以提高各分析中心最终钟差产品的一致性。

图 14 和图 15 分别描述了本文提出的钟差综合 方法和 ISC 中心钟差综合策略,由于 ISC 钟差综合 策略前期采用逐历元校准的方法,因此会受到所选 择的参考分析中心钟差质量的影响。相对于 ISC 钟差综合方案,本文提出的钟差综合方法首先需要 找到适合 2 家分析中心的钟差模型,进而分别对 2 家分析中心的原始钟差序列进行拟合,求得残差值 6,并以此进行定权,这样就会消除由于所选择的参 考分析中心钟差质量不好带来的误差。

ns



Fig. 10 Galileo clock offsets relative deviation of SHA & WHU



Fig. 11 GPS clock offsets relative deviation of SHA & WHU



Fig. 12 GLONASS clock offsets relative deviation of SHA&WHU



图 15 ISC 综合中心钟差综合策略

Fig. 15 Integrated strategy of clock offsets in ISC integrated center

#### 3 结论与展望

本文针对 iGMAS 不同分析中心的轨道产品和 钟差产品本身之间存在的一致性问题,提出了通过 建立多项式+不同周期项模型对钟差产品进行拟 合求得残差序列,利用残差序列对不同分析中心的 钟差值进行定权,从而求得 2 家分析中心的加权均 值作为钟差综合值,以此提高不同分析中心钟差产 品之间的一致性。实验结果发现:

1)不同分析中心的轨道径向和钟差相对偏差 存在明显的周期项,并且轨道径向与钟差呈现负相 关的特征,这说明不同分析中心的轨道和钟差产品 存在一致性问题。 2)以 SHA& WHU 为例,分析发现 BDS、GPS、 GLONASS 有明显的 12h 和 24h 周期项,Galileo 有 明显的 12h 周期项,但 24h 周期项不明显;除此之 外,BDS 还有 48h、8h 和 6h 周期项,GLONASS 还 有明显的 8h 周期项。4 个系统钟差相对偏差主周 期项存在差异,BDS 和 Galileo 的主周期项均约 12h,而 GPS 和 GLONASS 的主周期项约 24h。

3)将本文提出的钟差综合模型得到的钟差综合值与 ISC 钟差产品对比发现,钟差综合值可以明显提高各分析中心的钟差产品一致性。

4)本文提出的方法仅对不同分析中心的钟差 产品进行了综合,在一定程度上提高了各分析中心 的一致性,但并未对轨道产品的一致性进行改善。

57

故接下来将研究如何对不同分析中心的轨道进行 产品综合,以提高轨道的一致性。

#### 参考文献

- [1] Cai Hongliang, Chen Kangkang, Xu Tianhe, et al. The iGMAS combined products and the analysis of their consistency[C]// Proceedings of the 2015 China Satellite Navigation Conference (CSNC). Springer Berlin Heidelberg, 2015: 213-226.
- [2] 谭畅. GNSS 轨道、钟差产品综合及性能分析[D]. 武汉:武汉大学, 2017.
  Tan Chang. GNSS orbit, clocks combination and analysis on the precision[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017(in Chinese).
- [3] Wang Qianxin, Hu Chao, Zhang Kefei. A BDS-2/ BDS-3 integrated method for ultra-rapid orbit determination with the aid of precise satellite clock offsets
   [J]. Remote Sensing, 2019, 11(15): 1758.
- [4] Hu Chao, Wang Qianxin, Min Yanghai, et al. An improved model for BDS satellite ultra-rapid clock offset prediction based on BDS-2 and BDS-3 combined estimation[J]. Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, 2019, 54(4): 513-543.
- [5] Wang Qianxin, Hu Chao, Mao Ya. Correction method for the observed global navigation satellite system ultra-rapid orbit based on dilution of precision values[J]. Sensors, 2018, 18(11):3900.
- [6] Dow J, Neilan R E, Rizos C, et al. The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems [J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(7): 191-198.
- [7] Kouba J, Springer T. New IGS station and satellite clock combination[J]. GPS Solutions, 2001, 4(4): 31-36.
- [8] Ouba J, Mireault Y, Lahaye F. IGS orbit/clock combination and evaluation[R]. Appendix of the Analysis Coordinator Report, International GPS Service for Geodynamics Annual Report, 1994: 70-94.
- [9] Steigenberger P, Hugentobler U, Loyer S, et al. Galileo orbit and clock quality of the IGS multi-GNSS experiment[J]. Advances in Space Research, 2014,

55(1): 269-281

[10] 魏娜,施闯,李敏,等. IGS产品的一致性分析及评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,34(11): 1363-1367.

Wei Na, Shi Chuang, Li Min, et al. Analysis and assessment of IGS products consistencies [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11): 1363-1367(in Chinese).

- [11] 陈俊平,周建华,严宇,等.GNSS数据处理时空参数的相关性[J].武汉大学学报(信息科学版),2017 (11):152-160.
  Chen Junping, Zhou Jianhua, Yan Yu, et al. Correlation of spatial and temporal parameters in GNSS data analysis[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017(11): 152-160(in Chinese).
- [12] Zhao Qile, Wang Chen, Guo Jing, et al. Precise orbit and clock determination for BeiDou-3 experimental satellites with yaw attitude analysis[J]. GPS Solutions, 2018, 22(1): 4.
- [13] 胡丽莹,肖蓬.快速傅里叶变换在频谱分析中的应 用[J].福建师范大学学报(自然科学版),2011(4): 27-30.

Hu Liying, Xiao Peng. Application of fast Fourier transform in frequency and spectrum analysis[J]. Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2011(4): 27-30(in Chinese).

[14] 黄观文,余航,郭海荣,等.北斗在轨卫星钟中长期
 钟差特性分析[J].武汉大学学报(信息科学版),
 2017,42(7):982-988.

Huang Guanwen, Yu Hang, Guo Hairong, et al. Analysis of the mid-long term characterization for BDS on-orbit satellite clocks [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42 (7): 982-988(in Chinese).

[15] 毛亚,王潜心,胡超,等.北斗三号试验卫星的钟差 评估及预报[J].天文学报,2018,59(1):1-14.
Mao Ya, Wang Qianxin, Hu Chao, et al. Performance analysis and prediction of clock offsets for the BDS-3 test satellites[J]. Acta Astronomica Sinica, 2018, 59(1):1-14(in Chinese).