

GNSS 轨道钟差产品综合综述

朱红玉^{1,2} 陈俊平^{1,2} 张益泽^{*,1}

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: 全球导航卫星系统(GNSS)精密轨道钟差产品是实现高精度精密单点定位(PPP)的前提,也是高精度GNSS应用的基础。综合GNSS轨道钟差能够有效提高产品的精度和稳定性,因此开展GNSS轨道钟差产品综合方法研究,实现稳定可靠的轨道与钟差组合产品服务,具有重要研究意义和应用价值。本文首先介绍了GNSS星座与IGS服务中心概况,梳理出轨道钟差综合的函数模型及构建综合模型中的关键问题,在现有的动力学法和加权平均法两种综合方法的基础上系统地介绍加权平均综合法的整体流程以及加权平均的定权方式;归纳了GNSS轨道钟差产品多系统、事后、实时综合技术的进展,对综合产品精度及定位结果进行分析,并根据分析结果评估各综合方法;最后,介绍现有实时轨道钟差综合产品的现状尤其是精度,讨论GNSS实时轨道钟差综合目前存在的不足与面临的挑战,并展望了已有产品综合研究对GNSS实时轨道钟差综合和实时精密单点定位带来的机遇。

关键词: 轨道综合;钟差综合;多卫星导航系统;精密单点定位

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2023.04.002

Review of GNSS Orbits and Clocks Products Combination

ZHU Hongyu^{1,2} CHEN Junping^{1,2} ZHANG Yize^{*,1}

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

2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: GNSS (Global Navigation Satellite System) precision orbits and clocks product is the premise of realizing high-precision PPP (Precise Point Position) and the basis of high-precision GNSS application. Therefore, it is of great research significance and application value to develop a combination method of GNSS orbits and clocks product and realize a stable and reliable orbit and clock combined product service. This paper introduces the general situation of the GNSS constellation and IGS (International GNSS Service) service center, combs the functional model of orbit clock combination synthesis, comprehensively analyzes and discusses the progress of GNSS orbit clock combination product synthesis technology, and looks forward to the opportunities brought by existing research on GNSS real-time orbit clock combination synthesis and real-time precise single point positioning.

Keywords: Orbit Combination; Clock Combination; Multi-navigation Satellite System; Precise Point Positioning

自美国 1995 年成功运行 GPS 系统、俄罗斯研
制 GLONASS 系统后,我国在 2000 年成功发射自

主研制的北斗一号卫星,并按照国家制定的“三
步走”规划逐渐完成北斗系统的建立。此外,欧

* E-mail: zhyize@163.com ; Tel: 021-34775225

盟的 Galileo 系统自 2016 年起开始提供服务,日本的 QZSS 系统和印度的 IRNSS 系统也逐步建立。GNSS 正在步入以 GPS、GLONASS、BDS、Galileo 这四大系统为主,涵盖其他卫星导航系统的多系统并存时代(表 1)。

表 1 在轨正常运行的导航卫星

Tab. 1 Navigation Satellite in Normal Operation in Orbit

导航卫星系统	轨道类型	卫星数量(个)	信号
GPS	MEO	31	L1C / A, L2c, L5
GLONASS	MEO	22	L1C / A, L2C / A, L3
Galileo	MEO	24	E1, E5a, E5b, E5a, E6
BDS	BDS-2 GEO	5	B1I, B2I, B3I
	BDS-2 IGSO	7	B1I, B2I, B3I
	BDS-2 MEO	3	B1I, B2I, B3I
	BDS-3 GEO	3	B1I, B3I
	BDS-3 IGSO	3	B1I, B3I, B1C, B2a, B2b
	BDS-3 MEO	24	B1I, B3I, B1C, B2a, B2b
QZSS	GEO	1	L1C / A, L1C, L2C, L5
	IGSO	3	L1C / A, L1C, L2C, L5
IRNSS	GEO	3	L5, S
	IGSO	5	L5, S

伴随着 GNSS 各大系统的全面发展,GNSS 地面跟踪站的数量也在不断增加。作为国际上 GNSS 领域最为权威的机构,国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)公开了全球分布的大量 GNSS 测站数据,截至 2023 年 1 月,IGS 包含的 GNSS 跟踪站已达 500 个以上。这些 IGS 跟踪站均装载测地型接收机,可以接收双频甚至多频的多模 GNSS 卫星信号。

精密单点定位(Precise Point Position, PPP)^[1]是继实时动态定位(Real Time Kinematic, RTK)以及网络 RTK 后出现的又一种 GNSS 高精度定位方式,指的是用户利用 GNSS 接收机的载波相位和伪距观测值,依赖高精度的卫星轨道钟差产品,通

过改正模型实现高精度定位的方法^[2]。PPP 具有定位精度高、定位方便、不受基准站限制的优势,在智能交通等方面有着广阔的应用前景,将成为未来高精度导航定位的重要手段。随着 GNSS 场景应用的多元化,用户对高精度实时定位的需求逐渐增加,实时精密单点定位(RealTime-Precise Point Position, RT-PPP)是当下非常值得研究的技术。2007 年 IGS 启动了实时计划项目(IGS-RTPPP)^[3],在该项目的推动下,截至 2023 年 5 月,全球范围已有超过 300 个跟踪站可以提供 RTCM 格式的实时观测数据^[4]。在 PPP 中,影响其定位结果的误差主要与卫星、接收机和信号传播有关,其中与卫星有关的误差主要包括卫星的轨道和钟差,因此卫星精密的轨道、钟差是实现 PPP 的重要前提^[5-7]。

目前,由国际大地测量协会(International Association of Geodesy, IAG)协调组织的 IGS 和中国组织的国际 GNSS 监测评估系统(International GNSS Monitoring & Assessment System, iGMAS)下设的各家分析中心均提供了事后或实时的轨道和钟差产品(表 2)。图 1 显示了 IGS 各家分析中心 GPS 最终轨道和钟差产品精度图。从图中可以看到,钟差与轨道精度不断提升,直至 2023 年轨道精度稳定在 25 mm 内,钟差精度稳定在几十皮秒内。

高精度的卫星轨道钟差产品是实现高精度定位所需的基础产品。随着 GNSS 的蓬勃发展,各分析中心发布的轨道钟差产品在处理模型、坐标基准上存在差异,且单一分析中心的轨道钟差数据存在中断、跳变等情况。为提供高精度高稳定性卫星轨道钟差产品,对各家分析中心的产品进行综合处理变得十分必要,可为高精度 GNSS 定位服务提供数据支撑。

表 2 IGS 分析中心

Tab.2 IGS Analysis Center

所在国家	机构名称	机构缩写
美国	美国喷气动力实验室	JPL
	麻省理工学院	MIT
	美国海洋大气局	NGS
	斯克里普斯海洋学研究所	SIO
	美国海军天文台	USNO
德国	欧洲空间局	ESA
	德国地学研究中心	GFZ
加拿大	加拿大自然资源部	EMR
中国	武汉大学	WHU
捷克	佩克尼大地测量天文台	GOP-RIGTC
法国	法国空间研究中心	GRG
瑞士	欧洲定轨中心	CODE

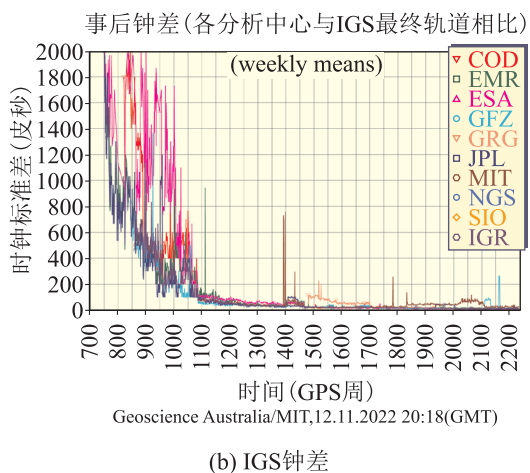
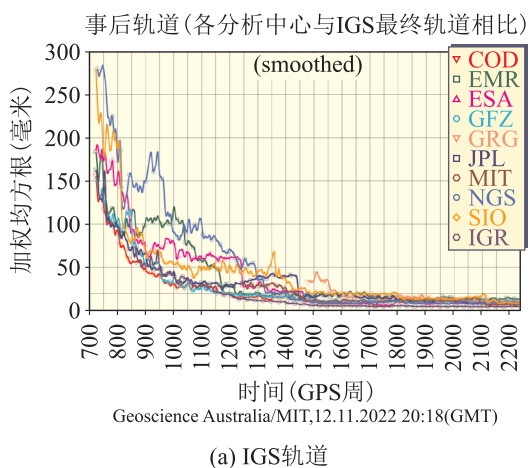


图 1 IGS 轨道钟差精度图

Fig.1 IGS Orbit Clock Accuracy Diagram

1 轨道钟差综合基本流程

现有研究将轨道综合的方法总体分为动力学法和加权平均法。前者将各个分析中心计算得到的卫星轨道产品作为虚拟观测值,通过动力学拟合方法,解算轨道初始状态参数和轨道动力学参数,再进行轨道积分获得轨道产品;后者是目前研究比较成熟的方法,国内外众多学者对其系统误差处理、定权策略问题提供了较好的解决方案,相似的加权平均方法也被应用于钟差综合。本节将结合现有研究成果,系统介绍基于加权平均的轨道钟差综合流程。

1.1 轨道综合

卫星轨道是精密定位、钟差估计、对流层参数估计等所需要的重要参数,因此研究提高卫星轨道精度具有重要意义。目前,各分析中心提供的事后轨道产品,尤其是 GPS 系统的精度都非常高,但各分析中心使用的轨道参考框架不同,且少部分分析中心对于除 GPS 外的其他 GNSS 系统的轨道精度有待提高。使用轨道综合的方法既可以统一各分析中心的参考框架,又可以生成更高精度的轨道产品。其原理是基于加权平均的思想,将各分析中心提供的轨道统一到同一参考框架下,随后根据验后方差重新定权后进行迭代加权平均,总体流程如图 2 所示。

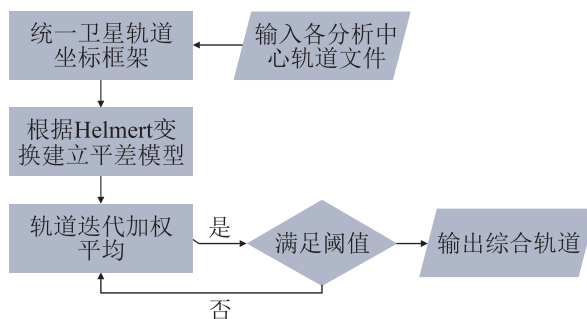


图 2 轨道综合流程图

Fig.2 Orbit Combination Flow Chart

轨道综合可表示为

$$orb_{com} = \frac{\sum_{i=1}^n P^i \times orb_j^i}{\sum_{i=1}^n P^i} = \frac{\sum_{i=1}^n P^i (orb_j^i + T_j + D_j orb_j^i + R_j orb_j^i)}{\sum_{i=1}^n P^i}$$

其中, orb_{com} 为综合的卫星轨道, orb_j^i 为 j 分析中心 i 卫星的轨道, P^i 为 i 卫星的权重, T_j 、 D_j 、 R_j 为 j 分析中心轨道与综合轨道间的平移、尺度、旋转参数。

经过迭代处理可以降低轨道质量较差的分析中心权重, 提高高质量分析中心权重, 从而得到精度更高且更稳定的轨道综合产品。

1.2 钟差综合

卫星钟差是实现精密定位和卫星精密定轨的重要数据。随着对钟差研究的不断发展, 钟差产品综合的方法得到了改进和完善。基本思路是在统一钟差参考基准、改正模型误差等一系列钟差预处理后, 使用与轨道综合类似的方式对不同分析中心的钟差产品进行迭代加权平均, 总体流程如图3所示。

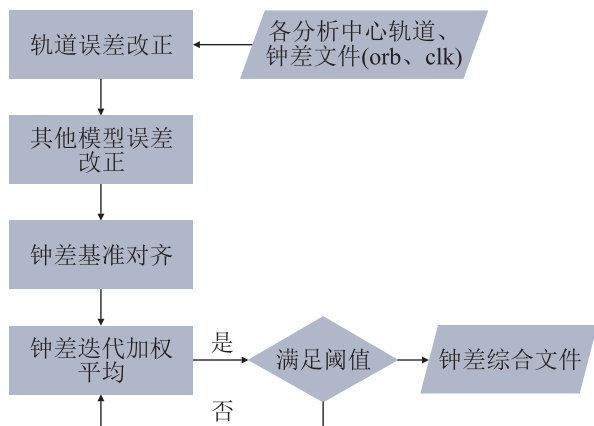


图3 钟差综合流程图

Fig.3 Clock Combination Flow Chart

钟差综合的数学模型可表示为^[8]

$$clk^j(t) = D_t + B_t^{sys} + m_t + b^j + \varepsilon_t$$

其中, $clk^j(t)$ 表示在 t 时刻 j 卫星的钟差值; D_t 表示在 t 时刻卫星钟差产品在 GPST 下的时间基准; B_t^{sys} 表示系统 sys 相对于 GPS 系统钟差基准的系统间偏差, 包含不同 GNSS 系统间的差异和地面参考站接收机对不同系统的伪距信号硬件延迟的差异^[9]; m_t 表示在 t 时刻卫星钟差在径向所吸收的轨道误差以及其他模型误差的改正值^[10]; b^j 表示 j 卫星的初始钟偏差值^[11]; ε_t 为包含系统误差的其它误差。

由于在各分析中心解算钟差时参考的基准不一样, 导致各分析中心的时间基准存在差异, 如不修正会对后续的钟差综合产生较大影响, 所以在钟差综合前, 要先进行各个分析中心的钟差基准的对齐^[12]。

$$\Delta D_{ij,t}^G = \frac{1}{n} \sum_s^n (clk_{j,t}^s - clk_{i,t}^s)$$

其中, $\Delta D_{ij,t}^G$ 表示 i 、 j 分析中心间 GPS 钟差基准在 t 时刻的差值, n 表示卫星数量, s 表示不同分析中心共有的 GPS 卫星, $clk_{j,t}^s$ 、 $clk_{i,t}^s$ 分别表示 j 、 i 分析中心在 t 时刻 s 卫星的钟差值。

不同的 GNSS 系统时由各自地面控制中心的原子钟维持, 相互之间存在系统时差异。不同分析中心估计卫星钟差时所选用的基准站不同, 因此不同分析中心间的钟差产品存在系统间偏差, 如不消除会对综合结果产生影响^[9], 计算公式如下。

$$\Delta B_{ij,t}^{G,sys} = \frac{1}{n} \sum_s^n (clk_{j,t}^s - clk_{i,t}^s) - \Delta D_{ij,t}^G$$

其中, $\Delta B_{ij,t}^{G,sys}$ 表示 i 、 j 分析中心间 GNSS 系统的钟差基准相对于 GPS 系统钟差基准在 t 时刻的差值, G 表示 GPS 系统, sys 表示其他 GNSS 系统, $clk_{j,t}^s$ 、 $clk_{i,t}^s$ 分别表示 j 、 i 分析中心在 t 时刻 s 卫星的钟差值, $\Delta D_{ij,t}^G$ 表示 i 、 j 分析中心间 GPS 钟差基准在 t

时刻的差值。

精密钟差不仅是原子钟相对于时间系统的偏差值,还吸收了由卫星轨道径向和卫星姿态等误差,计算公式如下。

$$\Delta m_i^s = \Delta m_{orb,t}^s + \Delta m_{att,t}^s$$

其中, Δm_i^s 表示在 t 时刻 s 卫星的模型误差改正数, $\Delta m_{orb,t}^s$ 、 $\Delta m_{att,t}^s$ 分别表示在 t 时刻 s 卫星的轨道改正数和姿态改正数。

由于 GNSS 卫星在较高的空中,接收机所观测到的卫星与其轨道径向十分接近,使得卫星轨道的径向误差与钟差耦合,所以模型误差改正数在大多数情况下是对卫星轨道的径向改正。目前 IGS 用到的改正方式由 Kouba J 等提出^[13],公式如下。

$$\Delta m_{orb,t}^s = \frac{(X_{AC,t}^s - X_{ref,t}^s) \cdot X_{AC,t}^s}{c \cdot R_t^s}$$

式中, $\Delta m_{orb,t}^s$ 表示 s 卫星在 t 时刻由轨道径向误差产生的钟差改正数, $X_{AC,t}^s$ 、 $X_{ref,t}^s$ 分别表示 AC 分析中心和参考分析中心(一般指综合后的轨道) s 卫星在地心地固坐标系下 t 时刻的三维坐标, c 为光在真空中传播的速度, R_t^s 为 s 卫星在 t 时刻相对于地心的距离,可以由三维坐标求得。

此外,模型误差还包含由卫星姿态差异产生的钟差改正数,可由 Loyer S 等^[14]提出的公式进行改正。

$$\Delta m_{att,t}^s = \frac{\Delta \varphi_i^s}{2\pi \cdot f_{NL}^s}$$

式中, $\Delta m_{att,t}^s$ 表示 s 卫星在 t 时刻由卫星姿态引起的钟差改正数, $\Delta \varphi_i^s$ 表示两个分析中心之间的 s 卫星在 t 时刻的偏航角差值, f_{NL}^s 表示 s 卫星对应的窄巷线性组合的频率。

由于不同分析中心的初始钟偏差不一致,需要对每颗卫星单独进行对齐,公式如下。

$$\Delta b_{i,j}^s = \frac{1}{n} \sum_k^n (clk_{j,k}^s - clk_{i,k}^s)$$

其中, $\Delta b_{i,j}^s$ 表示 i,j 分析中心 s 卫星的初始钟偏差改正值, n 表示历元总数, $clk_{j,k}^s$ 、 $clk_{i,k}^s$ 分别表示经过钟差基准对齐、系统间偏差改正和模型误差改正后 j,i 分析中心 s 卫星在 k 历元的钟差值。

经过上述钟差基准矫正、系统间偏差对齐、模型误差改正、初始钟偏差对齐的四个预处理步骤,可以得到不同分析中心之间参考同一钟差基准、无系统间偏差的钟差数据。为了得到更精密的钟差产品,需将各个分析中心的精密钟差进行迭代加权平均,初始权重设为等权,后续权重根据前一次综合与各分析中心的验后方差确定,计算公式如下。

$$clk_{com}^i = \frac{\sum_{j=1}^n P_j^i \times clk_j^i}{\sum_{i=1}^n P_j^i}$$

其中, clk_{com}^i 表示综合后的钟差, P_j^i 表示 j 分析中心 i 卫星的权重, clk_j^i 表示 j 分析中心 i 卫星经过预处理后的钟差值。

经预处理的不同分析中心钟差值进行综合后,维持了综合产品的一致性,消除了不同分析中心因参考钟选取不同所带来的影响,可有效提高钟差产品的稳定性和精度。

2 轨道钟差综合研究现状

2.1 轨道综合

早在 1994 年, Gerhard Beutler 等^[15]就开始对卫星轨道综合的研究并提出了钟差综合的猜想。文中提到了两种轨道综合的方法,第一种方法首先将所有参考分析中心的轨道转换为与国际地球参考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)一致的公共参考系,随后采用加权平均综合^[16]。这种方法的优点是简单和灵活,类似的算法可用于卫星钟差的综合;缺点是在某些情况下

对于不连续的轨道所综合出来的轨道可能不再满足轨道动力学方程。CODE 分析中心首次用这种方法将 IGS 不同分析中心的轨道结合起来,综合的轨道是由不同分析中心计算得到的加权平均值。另一种方法是利用初始卫星状态向量和相关太阳压力参数进行综合,在一定条件下,这种方式相当于将单个轨道序列作为伪观测值引入轨道改正^[17],保证了卫星满足轨道动力学,但同时也增加了运算的复杂性。

为评估上述两种轨道综合方法,基于这两种方法分别进行综合实验^[15],结果显示这两种方法得到的综合轨道近乎相同,且精度优于 10 cm,高于单个分析中心 15 ~ 30 cm 的精度,定位精度也得到了提升,但并未解决地球自转参考系的选取、轨道的不连续性问题,也并未给出轨道的精度评估。为解决系统间差异问题,IGS 轨道综合解算方法在 IGS Annual Report 中被提出^[18]。此方法使用 L1 最小范数法计算转换参数改正差异,并利用加权平均法进行轨道综合。研究表明,分析中心产品一致性较好是轨道综合的前提^[19],为进一步提高综合轨道的精度,利用具有一致性的分析中心产品得到的综合轨道精度更高,且在综合的过程中考虑到多家分析中心的轨道,使得用于综合的卫星数更多,综合后的卫星质量更好。

为验证现有的轨道产品精度,在已有轨道综合方法和产品的基础上卫星轨道精度以多种方式被评估,包括计算综合轨道和各个分析中心轨道的加权均方根误差(Weighted Root Mean Square, WRMS),卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)检验以及使用轨道模型实现轨道的拟合和外推以解决轨道不连续问题^[20]。检验结果显示,GPS 轨道精度在 12 ~ 18 mm 之间,IGS 综合轨道的精度与单个分析中心相比提高了许多。

随着 GNSS 多系统轨道产品的发展,面向多系统的轨道综合研究相应开展。2021 年之前,尽管四大 GNSS 都提供相应的服务,但 IGS 主要集中于 GPS 和 GLONASS 的研究,为此基于 GNSS 五个系统轨道产品综合的策略方法被提出^[21],并根据此策略更新了 IGS 轨道综合软件,使其兼容 GNSS 多系统产品。实验结果显示,多系统 GNSS 轨道综合与传统的轨道综合之间的一致性优于厘米级。此外,文章^[21]还指出在轨道综合的过程中缺少对每个导航系统的特殊加权处理,例如 GPS 系统的轨道更精确,应该给与更高的权重。为检验 IGS 多 GNSS 轨道的质量,基于卫星激光测距观测和综合轨道的平均误差评估方式被提出,并以此对 GNSS 多系统轨道进行了评估^[22]。从综合轨道 WRMS 的轨道质量来看, GPS、GLONASS、Galileo、北斗 IGSO、北斗 MEO、北斗 GEO 和 QZSS 的三维平均误差依次为 9 mm、16 mm、15 mm、24 mm、24 mm、37 mm 和 26 mm (表 3)。结果显示, GPS 是所有 GNSS 系统中轨道质量最高的系统。

这些轨道综合方式都是基于一个星座的轨道,而获得多系统轨道综合产品需要适应不同 GNSS 星座改进的加权策略。在现有的 IGS 综合软件中, GPS 或 GLONASS 综合是完全独立于每个星座的,因此不适用于综合具有不同轨道质量的星座。利用一种基于方差分量估计(Variance Component Estimation, VCE)统一多系统 GNSS 轨道综合的方法可以解决以上问题,此方法使用了由 Teunissen 最初开发的最小二乘方差分量估计(Least-Squares Variance Component Estimation, LSVCE),研究者利用该方法研究了考虑不同分析中心的轨道方差和不同分析中心加上不同星座的轨道方差两种定权方式^[23]。实验结果表明,两种模型的轨道结果基本相似,只有 QZSS 系统才

表3 多系统轨道质量评估(单位:mm)^[22]

Tab.3 Multi-GNSS Orbit Quality Assessment (Unit: mm)^[22]

系统	类型	SLR 矫正	SLR 标准差	径向 标准差	三维 标准差
GPS	II	-	-	5	9
	III	-	-	11	19
GLONASS	K R09	-1	22	8	14
	M	-10	29	9	16
	M+	29	27	9	16
Galileo	FOC	-1	4	8	15
	FOCe	-2	20	9	16
	IOV	-11	24	9	16
BeiDou-2	GEO	-28	87	21	37
	IGSO	-21	51	14	24
	MEO	-9	29	13	24
BeiDou-3	MEO CAST	0	41	-	-
	MEO SECM	-5	37	-	-
	IGSO	-34	59	11	20
QZSS-1	GEO	9	81	-	-
	IGSO	18	74	17	29

能发现显著的RMS差异, GPS的RMS最小(小于25 mm), 而GLONASS和伽利略的RMS低于50 mm。北斗和QZSS的RMS值达到80 mm。使用综合轨道进行了PPP验证, 得到亚厘米级的GNSS相位残差, 证明轨道综合产品适用于高精度GNSS定位。

2.2 钟差综合

与GNSS轨道综合研究开展的同年, IGS对GPS15 min的轨道钟差进行综合^[18], 得出了比单个分析中心更加精密的产品, 并利用该产品对其他分析中心的轨道钟差进行评估。为解决IGS没有正式时钟产品的问题, 利用现有基于最小范数估计的IGS钟差组合方式, 一种事后钟差综合方法被提出^[13]。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。

基于IGS分析中心轨道、钟差综合理论, 不同分析中心轨道和钟差产品综合的几种加权方法被提出, 并比较了这几种方法综合结果的差异^[24]。为解决因未模型化的残余误差导致的不同分析中心钟差产品间的系统差异问题, 分别使用单历元校准和“三步法”钟差校准两种策略计算2015年的综合钟差, 以IGS产品为标准比较两种策略的优劣^[25], 结果显示, 利用“三步法”策略计算得到的综合钟差精度更高且质量稳定(表4), PPP结果显示综合产品在E、N、U方向的平均RMS依次为1.40 cm、1.01 cm和3.38 cm, 略低于精度最高的WHU分析中心。此研究为多系统GNSS钟差产品综合的研究提供了思路和方法。

表4 钟差产品RMS序列统计量(单位:ps)^[25]

Tab.4 RMS Sequence Statistics of Clock Products (Unit: ps)^[25]

产品	GPS			GLONASS		
	最小值	中位数	最大值	最小值	中位数	最大值
WHU	38	61	1235	68	151	1219
ISCO ¹⁾	36	61	1241	69	152	12
ISCI ²⁾	33	55	115	72	149	318

1) 传统方法钟差综合结果; 2) “三步法”钟差综合结果。

由于大多数钟差综合研究主要针对GPS系统, 应用于GLONASS系统的结果并不理想。为解决这一问题, 一种基于最小二乘的GLONASS系统钟差综合方法被提出^[26]。实验发现不同分析中心的钟差存在呈线性趋势的系统误差, 在消除线性误差的基础上采用L1范数估计的方式进行综合, 再对综合结果进行PPP验证, 静态PPP在N、E、U方向的精度依次为2.31 mm、2.95 mm和5.62 mm, 动态PPP的精度依次为1.20 cm、1.47 cm

和 3.01 cm,比传统的综合钟差的精度高出很多。

2.3 实时轨道钟差综合

自 IGS 组织在 2013 年提供实时产品服务后,国内外众多学者对实时轨道钟差综合展开了进一步研究^[27,28]。为评估 IGS 实时产品的质量,将实时产品与 IGS 快速产品比较的直接评估和利用实时产品进行精密单点定位的间接评估两种方式被提出^[29],实验结果显示 IGS 实时轨道产品的精度很高, GPS 达 48 mm, GLONASS 达 132 mm, GPS 和 GLONASS 的实时钟差精度达 84 mm (0.28 ns) 和 245 mm (0.82ns)。空间状态表示(State Space Representation, SSR)产品是实时精密单点定位中重要的改正之一,为验证现有的 SSR 产品的性能,通过最终产品与实时产品的 PPP 比较,评估了八个分析中心 SSR 产品的精度^[30],实验结果显示 GPS SSR 产品的卫星轨道精度优于 8 cm,钟差精度优于 0.3 ns; GLONASS SSR 产品的轨道精度优于 10 cm,钟差精度优于 0.6 ns; BDS 和 Galileo SSR 产品的轨道精度分别为 14.54 cm 和 4.42 cm,钟差精度分别为 0.32 ns 和 0.18 ns。

IGS 将各分析中心的实时产品进行综合,提供实时综合产品 IGC01、IGS01、IGS02、IGS03(表 5)。IGS02、IGS03 的轨道是选择一家分析中心的实时轨道作为综合轨道产品,未考虑切换分析中心轨道时不同分析中心轨道产品的系统偏差,所以其稳定性和精度均存在不足。

表 5 RTS 综合产品

Tab.5 Combination Product of RTS

产品名称	综合方案	轨道参考点
IGS01	单历元综合	卫星天线相位中心
IGC01	单历元综合	卫星质心
IGS02	卡尔曼滤波综合	卫星天线相位中心
IGS03	单历元综合	卫星天线相位中心

虽然 IGS 实时综合产品还存在一定的问题,

但相较于超快速产品的预报精度还是有所提高。Elsobeiey M 等^[31]研究了 IGS 实时轨道钟差产品在 PPP 应用中的性能,结果显示使用实时产品进行精密单点定位分别在 E、N、U 方向上的平均精度为 0.16 m、0.09 m 和 0.23 m,比使用超快速产品的预报部分定位结果提高了近 50%。由于网络传输、观测数据和分析中心解决方案的影响,单个分析中心产品会出现故障或异常值,对实时数据流进行综合可以解决这一问题,为此实时 GPS 钟差产品的综合方式被提出^[32],在改善问题的同时,还对综合产品进行 PPP 验证。实验结果如表 6 所示,综合产品的三维定位精度为 9.1 cm,不管是产品稳定性还是定位精度都比其他单个分析中心提高了很多。虽然该研究只针对 GPS 系统,没有考虑多系统,但为实时多系统 GNSS 钟差综合提供了可参考方法。

表 6 各分析中心及综合产品定位精度(单位:m)^[32]

Tab.6 Positioning Accuracy of Each Analysis Center and Combination Product (Unit: m)^[32]

	N	E	U	3D
CNES	0.039	0.053	0.138	0.154
DLR	0.047	0.085	0.129	0.163
ESA	0.025	0.039	0.083	0.096
GFZ	0.055	0.075	0.128	0.162
IGS01	0.040	0.062	0.136	0.155
IGS02	0.038	0.077	0.126	0.153
COMB	0.025	0.046	0.082	0.091

针对 IGS 提供的实时产品在精度和可靠性上有所不同的问题,通过卫星时钟偏移和平均时钟偏移率的方式验证了 IGS01 中始终基准跳变的现象并对其成因进行了分析,结果表明切换参考分析中心进行轨道综合时会引起时钟跳变^[33]。一旦发生基准跳变,所有卫星的钟差序列变化都非常大且所有卫星的钟差跳变几乎在同一时间发生。利用这两个特征作为识别跳变的依据进行检

测和补偿, PPP 在 N、E、U 方向上的精度分别提高了 61.5%、36.5% 和 55.1%。在以上众多理论和实际研究的基础上, 卫星实时轨道钟差的综合方法被进一步优化, 并在 PANDA 软件的基础上研发了 GNSS 实时精密卫星轨道钟差产品综合处理软件^[34]。

3 不足及展望

在过去的数十年间, GNSS 技术发展迅猛, 为满足高精度 GNSS 发展需求, 各家分析中心相应发布自家的精密轨道钟差产品, 与此同时, GNSS 轨道钟差综合技术的理论与方法也在不断地完善和成熟。目前, GPS 的轨道钟差产品精度较高, 综合的产品也稳定可靠, 而对于其他 GNSS 系统各分析中心的精度还有待提高, 尤其是北斗的 GEO 卫星, 产品综合的质量控制和策略都有待改进。

伴随着 GNSS 场景应用的多元化以及用户对高精度实时定位需求的增加, 实时的轨道钟差产品将为实时 PPP 服务提供数据支撑。现有的实时产品综合研究成果主要集中于单系统, 主要为 GPS 系统的实时综合研究, 或集中于对多系统的事后产品综合研究, 缺少对于其他 GNSS 系统, 尤其是对 BDS 的实时产品综合分析。随着实时服务的发展, 多家 GNSS 分析中心发布了实时轨道钟差产品, 实时的高精度轨道产品质量是 GNSS 实时精密定位的关键。因此, 研究多系统实时产品综合, 生成连续、稳定、高精度的产品, 实现用户实时 PPP 仍然是 GNSS 领域未来研究的方向。

参考文献

- [1] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1997, 102 (B3), 5005-5017.
- [2] SHEN Xiaobing. Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning [C]. *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. Salt Lake City, UT, 2001: 1532-1539.
- [3] ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, LI Pan, et al. Review of GNSS PPP and Its Application [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46 (10): 1399-1407.
- [4] IGS NETWORK. RTS STATIONS [EB/OL]. (2023-05-02) [2023-05-31]. <https://igs.org/imaps/map.html#!/?network=null&view=table>.
- [5] BAR-SEVER Y, BELL B, DORSEY A, et al. Space Applications of the NASA Global Differential GPS System [J]. *Jpl Technical Reports Institute of Navigation*, 2003, 42: 45-51.
- [6] COLLINS P, GAO Yang, LAHAYE F, et al. Accessing and Processing Real-time GPS Corrections for Precise Point Positioning ... Some User Considerations [C]. *Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, 2005: 1483-1491.
- [7] DIXON K. STARFIRE. A Global SBAS for Sub-decimeter Precise Point Positioning [C]. *Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. Fort Worth, TX, 2006: 2286-2296.
- [8] 潘元欣. 面向北斗/GNSS非差模糊度固定的精密钟差和相位偏差产品综合 [D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [9] CAI Changsheng, GAO Yang. Modeling and Assessment of Combined GPS/GLONASS Precise Point Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17 (2): 223-236.
- [10] LOU Yidong, ZHANG Weixing, WANG C, et al. The Impact of Orbital Errors on the Estimation

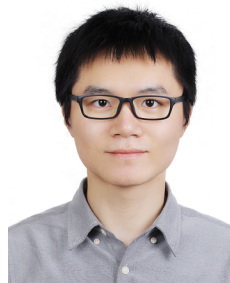
- of Satellite Clock Errors and PPP [J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(8):1571-1580.
- [11] GE Maorong, CHEN Junping, DOUŠA J, et al. A Computationally Efficient Approach for Estimating High-rate Satellite Clock Corrections in Realtime [J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1):9-17.
- [12] TEUNISSEN P J G, MONTENBRUCK O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems [J] 2017:983-1010.
- [13] KOUBA J, SPRINGER T. New IGS Station and Satellite Clock Combination [J]. *GPS Solutions*, 2001, 4(4):31-36.
- [14] LOYER S, BANVILLE S, GENG Jianghui, et al. Exchanging Satellite Attitude Quaternions for Improved GNSS Data Processing Consistency [J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(6):2441-2452.
- [15] BEUTLER G, KOUBA J, SPRINGER T. Combining the Orbits of the IGS Analysis Centers [J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 69:200-222.
- [16] SPRINGER T A., BEUTLER G. Towards an Official IGS Orbit by Combining the Results of All IGS Processing Centers [C]. *Proceedings of the 1993 IGS Workshop*, 1993: 242-250.
- [17] BEUTLER G, BROCKMANN E, GURTNER W, et al. Extended Orbit Modeling Techniques at the CODE Processing Center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS): Theory and Initial Results [J]. *European Respiratory Journal*, 1994, 19(6):367-386.
- [18] KOUBA J, MIREAULT Y, LAHAYE F. IGS Orbit/Clock Combination and Evaluation [R]. *International GPS Service for Geodynamics Annual Report*, 1994
- [19] MIREAULT Y, KOUBA J, LAHAYE F. IGS Combination of Precise GPS Satellite Ephemerides and Clocks [C]. *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications*, 1996:14-23.
- [20] GRIFFITHS J, RAY J R. On the Precision and Accuracy of IGS Orbits [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83:227-287.
- [21] SAKIC P, MANSUR G, MNEL B. A Prototype for a Multi-GNSS Orbit Combination [C] 2020 European Navigation Conference (ENC), 2020.
- [22] SOŠNICA K, ZAJDEL R, BURY G, et al. Quality Assessment of Experimental IGS Multi-GNSS Combined Orbits [J]. *GPS Solution*, 2020, 24:54.
- [23] MANSUR G, SAKIC P, BRACK A, et al. Combination of GNSS Orbits Using Least-squares Variance Component Estimation [J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96:92.
- [24] 陈康慷. IGS分析中心轨道/钟差产品综合及网解模式动态精密单点定位研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [25] 陈康慷, 徐天河, 杨玉国, 等. iGMAS GNSS钟差产品综合与评估 [J]. *测绘学报*, 2016, 45(S2):8.
- [26] CHEN Kangkang, XU Tianhe, YANG Yuanxi. Robust Combination of IGS Analysis Center GLONASS Clocks [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3):1251-1263.
- [27] DOW J M. International GNSS Service Call for Participation [J]. *IGS Real-time Pilot Project Committee*, 2007:67-80.
- [28] AGROTIS L, CAISSY M, RUELKE A, et al. Real-time Service Technical Report 2014 [J]. *IGS Central Bureau*, 2014:187.
- [29] HADAS T, BOSY J. IGS RTS Precise Orbits and Clocks Verification and Quality Degradation over Time [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1):93-105.
- [30] WANG Zhiyu, LI Zishen, WANG Liang, et al. Assessment of Multiple GNSS Real-time SSR Products from Different Analysis Centers [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(3):85.
- [31] ELSOBEIEY M, AL-HARBI S. Performance of

- Real-time Precise Point Positioning Using IGS Real-time Service [J]. GPS Solutions, 2016, 20(3): 565-571.
- [32] CHEN Liang, SONG Weiwei, YI Wenting, et al. Research on a Method of Real-time Combination of Precise GPS Clock Corrections [J]. GPS Solutions, 2016, 21(1):1-9.
- [33] ZHANG Liang, YANG Hongzhou, YAO Yibin, et al. A New Datum Jump Detection and Mitigation Method of Real-time Service (RTS) Clock Products [J]. GPS Solutions, 2019, 23(3):67.
- [34] 陈亮. 北斗/GNSS实时精密卫星轨道钟差产品组合理论与方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2021.

作者贡献说明

朱红玉:设计文章框架、收集、整理资料,撰写文章初稿;
陈俊平:指导文章撰写、核改;
张益泽:指导文章撰写、核改。

作者简介



张益泽:博士,副研究员;中国卫星导航定位协会青年工作委员会委员;获得2018年测绘科技进步奖一等奖(“北斗高精度星基广域差分关键技术及应用”,排名第八)、2018年中国卫星导航年会青年优秀论文二等奖;主要研究方向:GNSS精密定位(PPP/RTK/PPP-RTK), GNSS偏差分析,城市环境下精密定位(GNSS+INS),北斗广域增强。

美研究者利用工程菌合成非天然氨基酸

2023年5月15日, Nature Chemical Biology 报道,美国特拉华大学(University of Delaware)研究团队通过工程改造大肠杆菌,成功合成了一种先前被证实具有调控机体免疫功能的非天然氨基酸——对硝基-L-苯丙氨酸(pN-Phe)。研究者用单一细菌菌株来制造这些氨基酸,并将之放在目标蛋白质的特定位点。这一研究结果为将来开发独特的疫苗及免疫治疗方法提供了研究基础。

pN-Phe 是一种未被列入 20 个标准型氨基酸中的非天然氨基酸,具有稀有的硝基官能团,此前未在自然界中观察到。已有研究表明, pN-Phe 可以被添加到小鼠的蛋白质上,然后再输送回小鼠后,小鼠的免疫系统就会排斥该蛋白的原始版本,这种特性被期望被用来治疗和预防由免疫系统难以锁定的流氓蛋白质引起的疾病。

遗传密码扩展方法使研究人员能够增加由 DNA 编码的可用氨基酸的“字母表”。通过将代谢工程技术与遗传密码扩展相结合,研究者对硝化蛋白的分布式和自主生产创建了基础技术平台,下一步将继续优化研究方法,以合成更多的硝化蛋白质,并扩展到其他微生物。该研究的长期目标是进一步完善可用于疫苗或免疫疗法研发的应用平台。

吴晓燕(中国科学院成都文献情报中心)编译自
<https://www.nature.com/articles/s41589-023-01338-x>