

DOI:10.13203/j.whugis20170278



文章编号:1671-8860(2017)11-1649-09

# GNSS 数据处理时空参数的相关性

陈俊平<sup>1,2</sup> 周建华<sup>3</sup> 严宇<sup>1,4</sup> 陈倩<sup>1,2</sup> 王彬<sup>1</sup>

1 中国科学院上海天文台,上海,200030

2 中国科学院大学,北京,100049

3 北京卫星导航中心,北京,100094

4 同济大学测量与国土信息工程系,上海,200092

**摘要:**卫星轨道、钟差以及测站坐标等是全球导航卫星系统定位(global navigation satellite system,GNSS)的核心参数,构成了卫星导航系统数据处理的时空基准。通过比较国际 GNSS 服务(International GNSS Service,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、钟差存在明显差异,并且轨道、钟差的相对偏差存在很强的相关性。针对该问题,讨论了 GNSS 卫星轨道、钟差的相关性问题,分析了轨道、钟差相对偏差的周期特性,并提取了周期项模型参数;建立改正模型,提高了不同分析中心产品的一致性;对时空基准周期性误差的原因进行了分析,并以参数降相关为出发点,对 GNSS 时空基准精度提升的方法提出了建议。

**关键词:**GNSS;轨道;钟差;相关性

**中图法分类号:**P228.41

**文献标志码:**A

2015 年 2 月 26 日联合国大会通过了关于“为了社会的可持续发展建立全球大地测量参考框架”的决议,决议要求全球合作实现和维持高精度、稳定的大地测量参考框架。全球大地测量观测系统(Global Geodetic Observing system,GGOS)组织详细分析了未来科学、应用的发展对参考框架的需求,提出未来地球参考框架的精度要求为:坐标准确度 1 mm,稳定度 0.1 mm/a;尺度参数准确度达到  $0.1 \times 10^{-9}$ ,稳定度  $0.01 \times 10^{-9}/a$ <sup>[1]</sup>。

国际上统一的参考框架为国际地球参考框架(International Terrestrial Reference Frame,ITRF),其通过对测站坐标、地球自转参数以及相应的方差-协方差信息等时间序列的综合,得到指定参考历元的测站坐标、速度等信息,形成参考框架。目前 ITRF 的参考原点由激光测距(satellite laser ranging,SLR)观测确定,框架的尺度因子则由甚长基线干涉测量(verylongbaseline interferometry,VLBI)/SLR 的观测综合确定<sup>[2-5]</sup>,而全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)定位技术是极移参数计算以及 GNSS/SLR/VLBI 并址站高精度归心测量的最

有效手段<sup>[5]</sup>。此外,得益于 GNSS 技术在时空分辨率上的巨大优势,GNSS 技术是高精度时空基准传递的主要手段。

目前,GNSS 技术时空基准的确定精度相对于 GGOS 的要求还存在约一个量级左右的差距。为分析其精度瓶颈的原因,本文从国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service,IGS)不同数据分析中心提供的时空精密产品的比较着手,讨论了 GNSS 卫星轨道、钟差的相关性问题。分析发现,各分析中心的精密轨道、钟差存在明显差异,并且轨道、钟差的相对偏差存在很强的相关性。本文获取了轨道、钟差相对偏差的周期特性,提取了周期项模型参数,建立改正模型提高了不同分析中心产品的一致性;分析了周期项误差的产生原因,并以参数降相关为出发点,对 GNSS 时空基准精度提升的方法提出了建议。

## 1 卫星导航系统时空基准

时间、空间基准是卫星导航系统的核心参数。空间基准是通过在地面设置监测站,由监测站坐标实现的。其中,GPS 的参考系为 WGS-84,目前

收稿日期:2017-09-06

项目资助:国家自然科学基金(11673050,11403112);国家 863 计划(2014AA123102)。

第一作者:陈俊平,博士,研究员,博士生导师,主要从事卫星大地测量和地球动力学研究。junping@shao.ac.cn

采用的为归算至国际参考框架 ITRF2000 的 WGS-84(G1150),其与 ITRF2000 框架在历元 2001.0 的吻合程度约为  $1\text{ cm}^{[6]}$ 。全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)采用的参考系为 PZ-90,最新的 PZ-90.11 于 2014 年开始启用<sup>[7]</sup>,其定义的地心与 ITRF2008 的符合程度好于  $3\text{ mm}^{[8]}$ 。伽利略(Galileo)系统的参考框架为 Galileo 地球参考框架(Galileo terrestrial reference frame, GTRF),是通过综合处理 IGS 的全球 GPS 观测台站以及 GPS/伽利略在轨验证部件卫星(Galileo in-orbit validation element, GIOVE)多模 Galileo 实验传感器站(Galileo experimental sensor stations, GESS)观测台站的数据实现的,其测站坐标与 ITRF2005 的符合程度好于  $3\text{ mm}^{[9]}$ 。中国北斗导航卫星系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)以 2008-07-01 正式启用的 2000 中国大地坐标系统(China geodetic coordinate system 2000, CGCS2000)作为空间参考基准,其选用的坐标框架和历元分别为 ITRF97 和 2000.0<sup>[10]</sup>。

时间基准上, GPS 的时间基准为 GPST(GPS time),其在 1980-01-06T00:00:00 被设置成与协调世界时(coordinated universal time, UTC)完全一致, GPST 与世界原子时(international atomic time, TAI)之差是一个常数(19 s),不受跳秒的影响。GPST 的实现以及维持是基于地面原子钟组与星钟组合而成的纸面钟<sup>[11]</sup>。GLONASS 的时间基准为 GLONASS(TIME),其以中央同步器时间为基础产生,存在与 UTC 一样的跳秒。Galileo 的系统时间为 GST(Galileo system time),其基准与 GPST 一致,与 TAI 差 19 s,没有跳秒,并且通过两套精密时统设施(precise timing facilities, PTF)的钟组进行时间的维持<sup>[12]</sup>。北斗的时间基准为 BDT(BDS time),由北斗主控站的原子钟组定义,其在 2006-01-01T00:00:00 时被设置成与 UTC 完全一致,其后不受跳秒影响, BDT 与 TAI 之差为常数 33 s<sup>[13]</sup>。

时间、空间基准是卫星导航系统的核心参数,从上述可以知道,各个卫星导航系统的时空基准定义各不相同,其分别体现在导航系统的地面部分以及空间部分。地面部分体现为测站钟差、坐标,空间部分体现为卫星钟差、轨道。导航卫星向地面站(包括监测站)发射微波信号,用户接收后形成星地之间的观测,从而将导航系统的地面部分和空间部分统一到系统的时空基准之中。在高

精度应用领域,各卫星导航系统的空间基准一般都统一定义到最新的 ITRF 框架下,而时间基准一般归算到各系统的系统时间。

对于多 GNSS 系统数据的融合处理,为实现不同系统时空基准的统一,多系统整体数据处理一般采用的方法为:(1)框架约束,即把测站坐标约束在 ITRF 框架下,估计测站坐标、卫星轨道;(2)时间基准的统一,即固定若干个测站在 GPS 系统下的钟差,估计其他钟差参数以及双模站上的系统偏差参数。在此处理方法下,IGS 提供的测站坐标、卫星轨道(包括 GLONASS 轨道)都是基于 ITRF 框架,所有的钟差参数也统一于 GPST 系统。从而在多模观测的条件下,用户可以直接采用不同系统的卫星轨道、钟差进行定位。

## 2 卫星时空参数的偏差及其相关性

GNSS 数据处理中涉及大量强相关参数的处理,包括对流层参数与坐标高程分量<sup>[14]</sup>、系统偏差与钟差参数<sup>[15]</sup>等,其中,轨道与钟差的相关性很少见到相关讨论。虽然 IGS 最终轨道的精度已经达到  $2.5\text{ cm}$ ,钟差精度为  $0.2\text{ ns}$ ( $6\text{ mm}$ ),然而各分析中心提供的轨道、钟差在扣除系统性偏差之后,仍然存在明显的不一致。

图 1 显示了 2015-08-16~18, IGS 两个数据分析中心——德国地学研究中心(German Research Centre for Geosciences, GFZ)和欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)提供的 GPS、GLONASS、Galileo 以及北斗卫星精密轨道径向分量和钟差的差异。首先将两家分析中心每颗卫星相同时刻的轨道径向分量、钟差分别作差,得到直接差值;在此基础上为了消除两个分析中心存在的系统性偏差,每个系统选取一颗卫星作为参考卫星,将第一步得到的直接差值与参考卫星的直接差值相减,得到每颗卫星的轨道径向、钟差相对偏差。图 1 中每个系统各选取了一颗卫星作为示例,其他卫星的情况类似。理论上,如果轨道、钟差模型足够精确,不同分析中心获取的轨道、钟差参数只会存在由于参考基准不同而带来的系统性的偏差,相对差值应该呈现白噪声的特性。但是,从图 1 可看出两家分析中心的轨道径向、钟差相对偏差都呈现出了周期性的特征。GPS、GLONASS、Galileo 以及北斗卫星最大轨道相对偏差分别达到了 8、60、21、33 cm,最大钟差相对偏差分别达到 8、36、23、31 cm。

从图 1 也看到径向相对偏差、钟差相对偏差呈现明显的负相关的特性。图 2 表示了两者的相关关系,图中纵轴为轨道径向相对偏差,横轴为钟差相对偏差。从图 2 明显看出,轨道径向、钟差相

对误差呈现强相关,对于 GPS、GLONASS、Galileo 以及北斗卫星该相关系数分别达到了 $-0.7$ 、 $-0.8$ 、 $-0.9$ 、 $-1$ 。

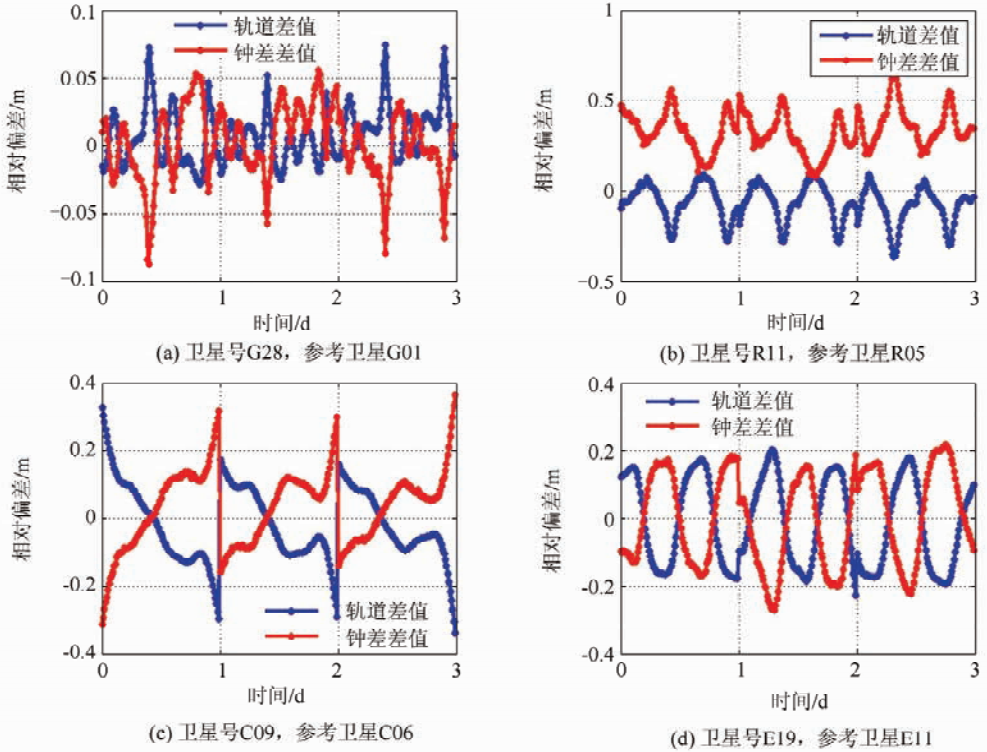


图 1 GFZ/CODE 卫星轨道径向以及钟差的相对偏差

Fig. 1 Satellite Orbit Radial & Clock Differences Between GFZ and CODE Products

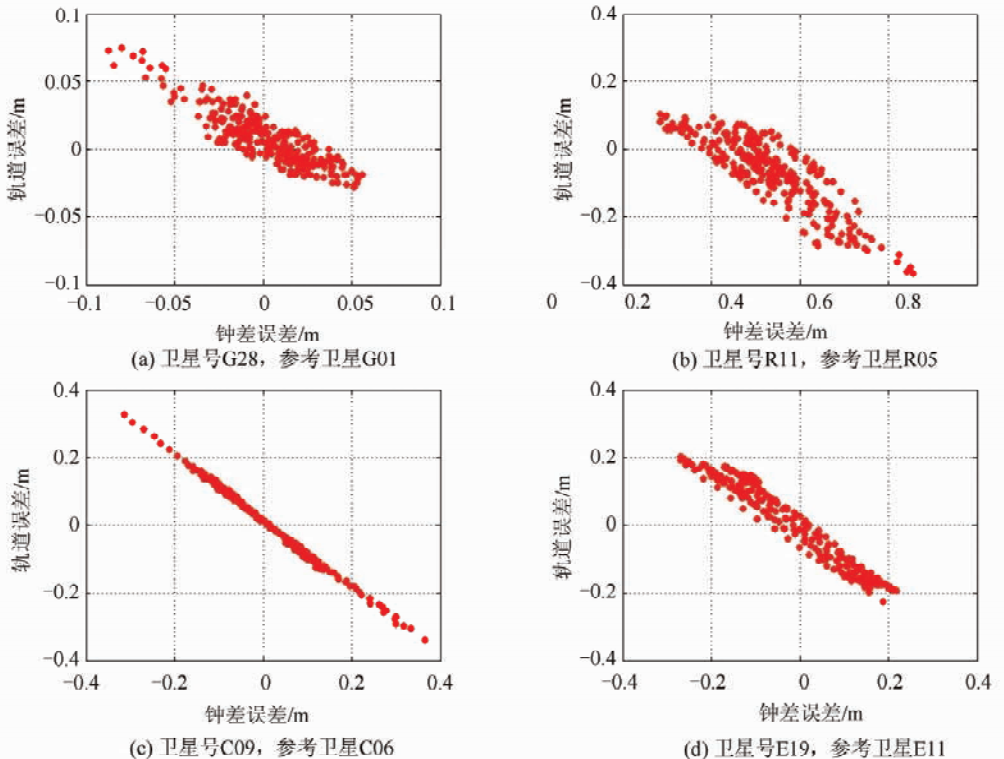


图 2 GFZ/CODE 卫星轨道径向以及钟差的相对偏差及其相关性

Fig. 2 Satellite Orbit Radial & Clocks Difference Between GFZ and CODE Products and Their Correlations

以上分析说明,目前 GNSS 高精度数据处理还存在一些明显的模型误差,并且基于目前 IGS 及其分析中心通用的数据处理模型和策略,卫星轨道径向误差与卫星钟差误差会互相补偿。

### 3 卫星时空参数偏差的周期性

从上文分析可以看到,不同分析中心的轨道径向相对偏差以及钟差相对偏差存在明显的周期性。取 IGS 及其分析中心 2015 年全年的精密轨道和精密钟差数据,采用与第 2 节相同的方法,对不同分析中心的轨道和钟差产品进行差分。在此基础上,分别采用最小二乘频谱分析(least

square spectrum analysis, LSSA)和快速傅里叶变换频谱分析(fast Fourier transform, FFT)对相对偏差的周期特性进行分析,并在频谱图峰值附近搜索主要周期<sup>[16-18]</sup>。两种方法都探测出了相同的周期信号。作为示例,图 3 和图 4 分别为欧洲空间局(European Space Agency, ESA)GNSS 数据分析和上海天文台(Shanghai Astronomical Observatory, SHA)GNSS 分析中心<sup>[19]</sup> G25 卫星、R05 卫星的精密轨道径向相对偏差以及卫星钟差相对偏差的频谱图。图 3、4 中的结果基于 LSSA 方法,且 G25 卫星、R05 卫星的相对偏差结果分别以 G01 和 R01 为参考卫星。

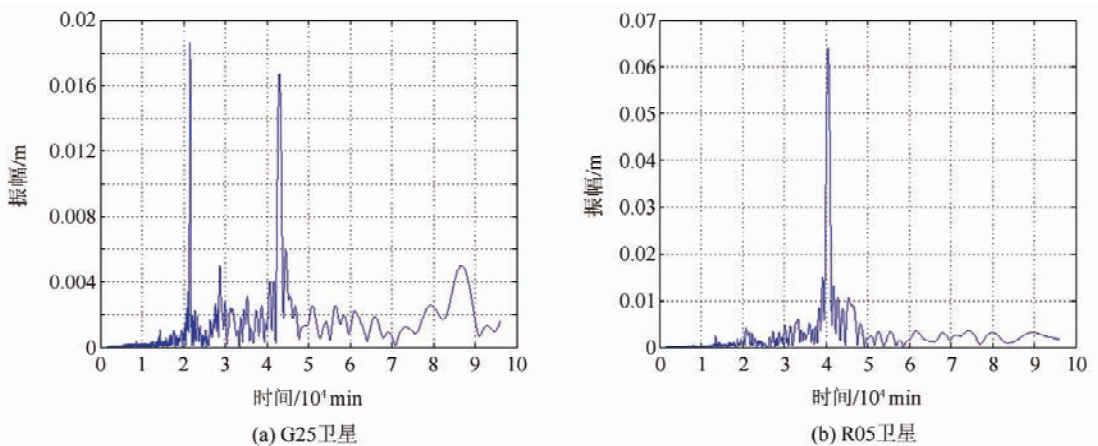


图 3 ESA/SHA 精密产品中卫星 G25,R05 轨道径向相对偏差的频谱图

Fig. 3 Spectrum of ESA/SHA Satellite Orbit Radial Differences with Maxium Period  $\tau$  Set as About  $10^5$  s

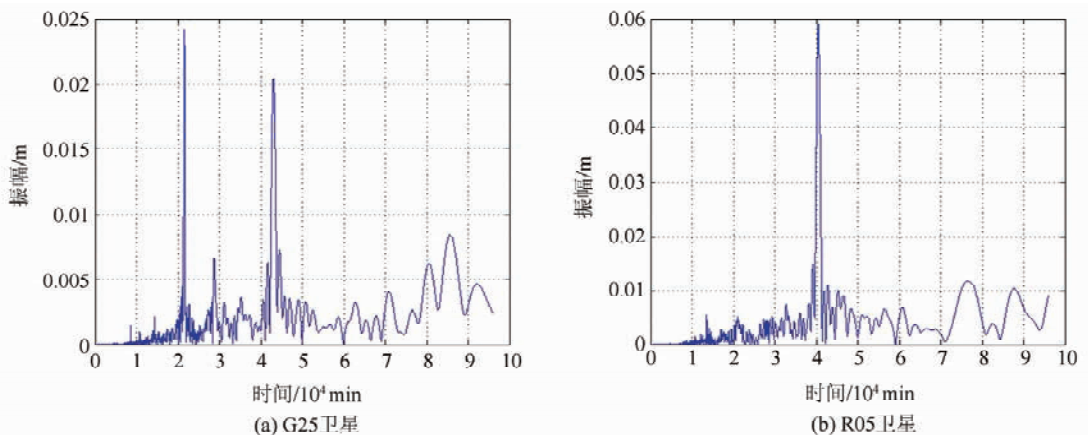


图 4 ESA/SHA 产品中卫星 G25、R05 卫星钟差相对偏差的频谱图

Fig. 4 Spectrum of ESA/SHA Satellite Clock Differences with Maxium Period  $\tau$  Set as About  $10^5$  s

从图 3 和图 4 中可以看出,不同分析中心的精密钟差以及精密轨道数据的相对偏差存在显著的周期项。GPS 卫星与 GLONASS 卫星相对偏差的周期项存在差异,其中 GPS 卫星相对偏差的显著周期分别为  $\tau_1 \approx \frac{1}{2} T_{\text{gps}}$ ,  $\tau_2 \approx \frac{2}{3} T_{\text{gps}}$ ,  $\tau_3 \approx$

$T_{\text{gps}}$ ,其中  $T_{\text{gps}}$  为 GPS 卫星运行一周的时间,约为 43 080 s; GLONASS 卫星轨道相对偏差的显著周期为  $\tau \approx T_{\text{glo}}$ ,其中  $T_{\text{glo}}$  为 GLONASS 卫星运行一周的时间,约为 40 500 s。

对 IGS 其他分析中心精密产品相对偏差的

周期性分析情况与以上的结果相近。以上差异表明目前国际上对这两个系统卫星的数据处理模型还存在特性不同的误差。此外,频谱分析结果表明 GLONASS 卫星的差异较 GPS 卫星的振幅更大,这与目前 GLONASS 卫星精密产品精度相对较低相对应。

#### 4 卫星时空参数偏差的周期项改正效果

根据频谱分析得到的结果,建立周期项改正

函数<sup>[16-17]</sup>,计算由主要周期项引起的相对偏差改正,并将该改正数分别改正到每颗卫星的精密钟差及轨道数据上。仍以 ESA/SHA 组合中 G25 卫星和 R05 卫星为例,图 5 和图 6 分别为去除周期项前后卫星轨道径向相对偏差以及卫星钟差相对偏差的 3 周数据的对比情况。

从图 5 和图 6 可以看出,去除周期项后,分析中心之间的 GPS 和 GLONASS 的精密钟差及轨道数据的相对偏差大大降低。对一年的数据进行分析统计,经过周期项改正后,所有数据中卫星轨道和钟差相对偏差降低的历元分别达到了 95.3%

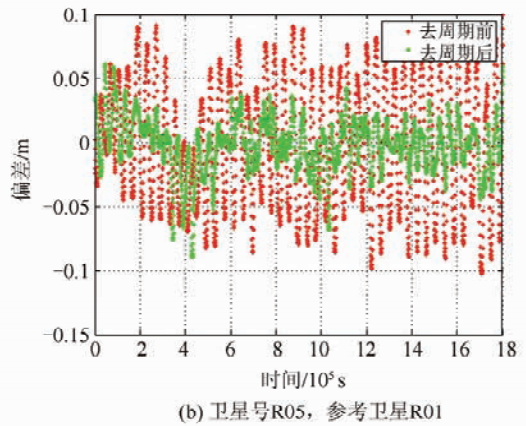
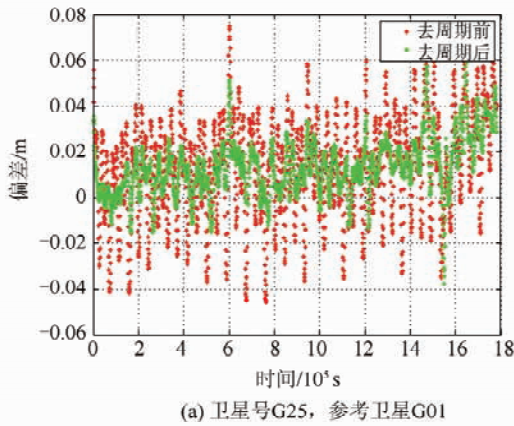


图 5 修正周期相前后 ESA/SHA 产品中卫星 G25,R05 卫星轨道径向相对偏差

Fig. 5 ESA/SHA Satellite Orbit Radial Differences with and Without Periodical Corrections

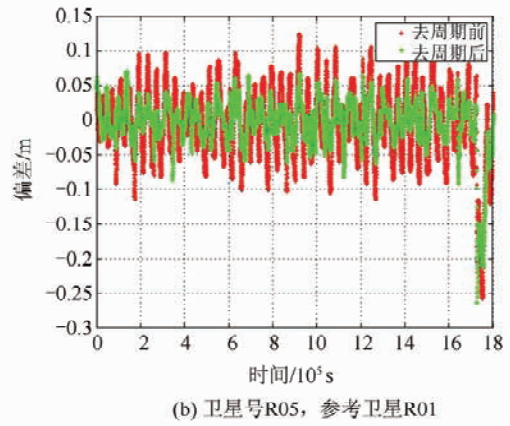
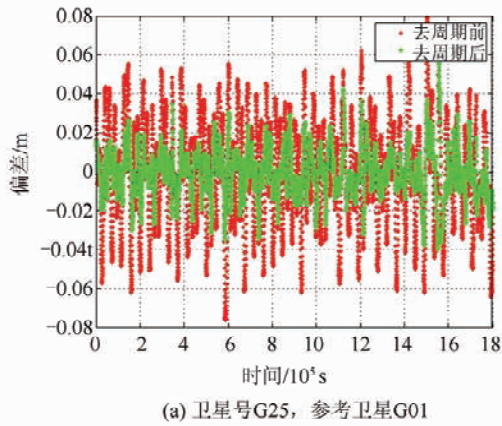


图 6 修正周期相前后 ESA/SHA 产品中卫星 G25,R05 卫星钟差相对偏差

Fig. 6 ESA/SHA Satellite Clock Differences with and Without Periodical Corrections

和 85.6%。通过主要周期项的改正降低了相对偏差的振幅,而相对偏差的均值的变化幅度影响较小,其影响范围基本在  $-0.2 \sim 0.2$  mm 之间。

进一步分析周期项修正前后轨道和钟差相对差值的 Allan 标准差<sup>[20]</sup>。同样以 ESA/SHA 组合中 G25 卫星和 R05 卫星为例,取 3 周数据进行计算,结果如图 7、8 所示。图 7 和图 8 分别为去除周期项前后卫星轨道径向相对偏差以及卫星钟

差相对偏差的 Allan 标准差  $\tau$  的对比情况。图 7、8 中,还画出了  $10^{-10} \times \tau^{-1}$  (FPM) 以及  $10^{-12} \times \tau^{-1/2}$  (WFM) 的曲线作为对比。图 7、8 中显示在改正周期项之前,G25 卫星的轨道、钟差相对偏差在  $\tau < 10^4$  s 时,其特性近似由  $\tau^{-1}$  变换到  $\tau^{1/2}$ ;在  $\tau > 10^4$  s 时表现出调相闪变噪声  $\tau^{-1}$  的特性。在改正周期项之后,G25 卫星的轨道、钟差相对偏差在  $\tau < 10^4$  s 时表现出调频白噪声  $\tau^{-1/2}$  的特性,在  $\tau$

>10<sup>4</sup> s时表现出调频白噪声调相闪变噪声 τ<sup>-1</sup>的特性。

在改正周期项之前,R05 卫星的轨道相对偏差在 τ<10<sup>4</sup> s 时,特性近似由 τ<sup>-1</sup> 变换到 τ<sup>1/2</sup>;而在 τ>10<sup>4</sup> s 时,其特性比较复杂,其在 2×10<sup>4</sup> s,6×10<sup>4</sup> s 以及 10<sup>5</sup> s 附近显示出强烈的周期性信号;通过周期项改正后,这些信号都得到了修正。

同样,R05 卫星钟差相对偏差在 1.5×10<sup>4</sup> s 附近的信号也得到了修正。

经过修正后,R05 和 G25 轨道相对偏差整体上性能相近;而 R05 的钟差相对偏差的 Allan 标准差在 τ<10<sup>5</sup> s 时比 G25 大了近一个量级,这可能反映了卫星钟差的性能差异或者目前 GLO-NASS 数据处理能力上的差异。

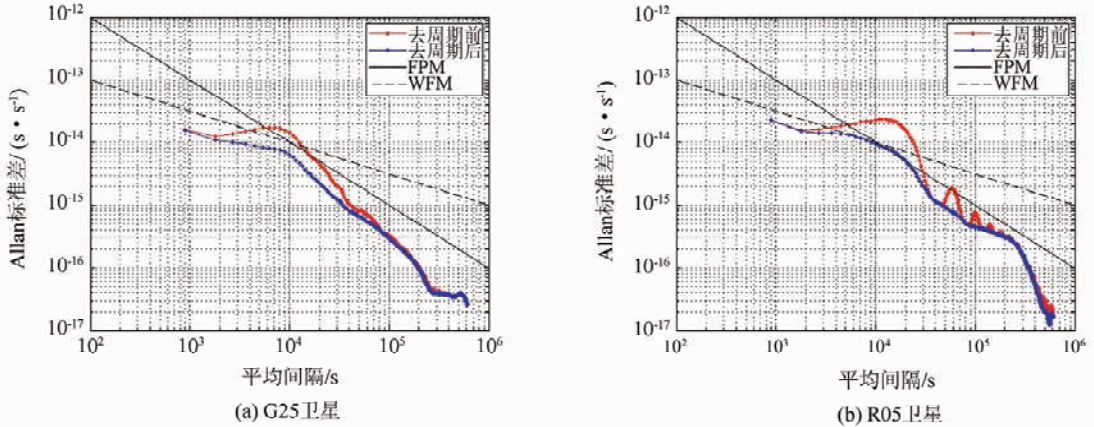


图7 修正周期相前后 ESA/SHA 产品中卫星 G25、R05 卫星轨道 Allan 标准差的变化情况

Fig. 7 AllanDeviation of ESA/SHA Satellite Orbit Radial Differences with and Without Periodical Corrections

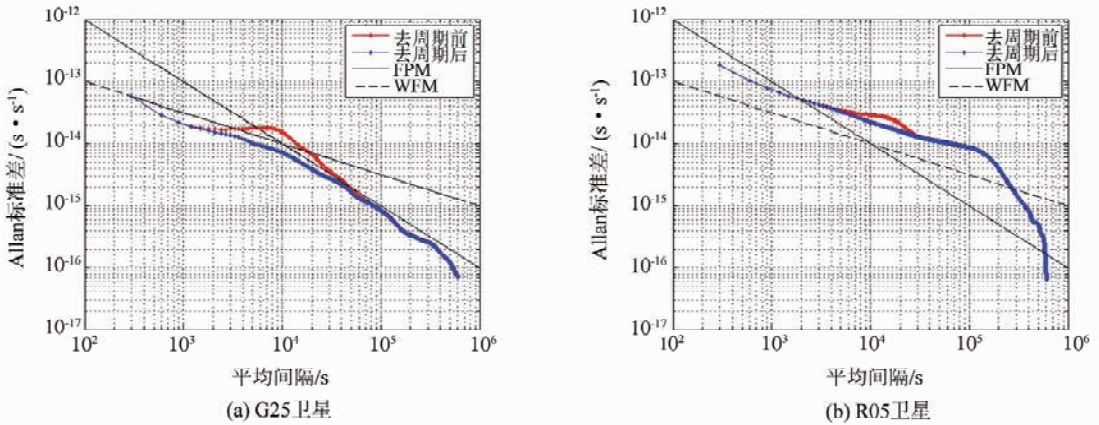


图8 修正周期相前后 ESA/SHA 产品中卫星 G25、R05 卫星钟差 Allan 标准差的变化情况

Fig. 8 Allan Deviation of ESA/SHA Satellite Clock Differences with and Without Periodical Corrections

### 5 卫星时空参数偏差周期性的成因分析

由于 IGS 各分析中心对于卫星轨道、钟差计算的模型和策略基本相同,因此,理论上不同分析中心计算的卫星钟差的偏差只会存在白噪声。以上分析得出的周期性结果,其反映的实际上是卫星轨道与卫星钟差相关造成的参数耦合的情况。

为进一步分析轨道、钟差参数耦合的情况,下文采用北斗数据进行分析。北斗系统设计了独特的星地双向时间比对系统,其通过卫星与地面监

测站双向的距离观测,可以直接测量卫星的钟差参数。星地时间比对精度不受卫星轨道、大气修正、测站坐标误差和测量模型误差的影响<sup>[21-22]</sup>,相对精度可达 0.1 ns。而采用 IGS 常规的基于接收机伪距和载波相位数据的多星定轨,在获得卫星轨道的同时,也可以实现卫星钟差的解算。将以上两种方法得到的卫星钟差结果进行比较<sup>[23]</sup>,图 9 列出了两颗卫星不同方法获取卫星钟差的差值,图 9 中黑色曲线表示多星定轨 3 d 定轨弧段内的钟差差值,绿线为拟合两种钟差差值的正弦曲线。

从图 9 中可以看出,两种方法得出的卫星钟

差除存在 1~2 ns 的系统性偏差以外,还具有明显的周期特性。进一步对两种方法得到的卫星钟差分析表明,系统性偏差是由于双向法时间同步采用的星地上下行设备与多星定轨采用的监测接收机之间存在零值差异;由于双向法时间同步不含有其他周期性的误差,因此该周期性的信号来自精密定轨数据处理。卫星时间(钟差)、空间(轨

道)参数的相关,造成轨道的误差被钟差参数吸收,从而造成了卫星钟差的周期性误差。

图 10 给出了 3 d 时间内 4 颗北斗卫星 C01、C05、C06、C09 两种钟差确定方法得到的钟差的差异以及该差异与卫星轨道角 $\mu$ (反映轨道周期)之间的函数关系式<sup>[23]</sup>,进一步验证了该周期性差异与卫星轨道周期的相关性。

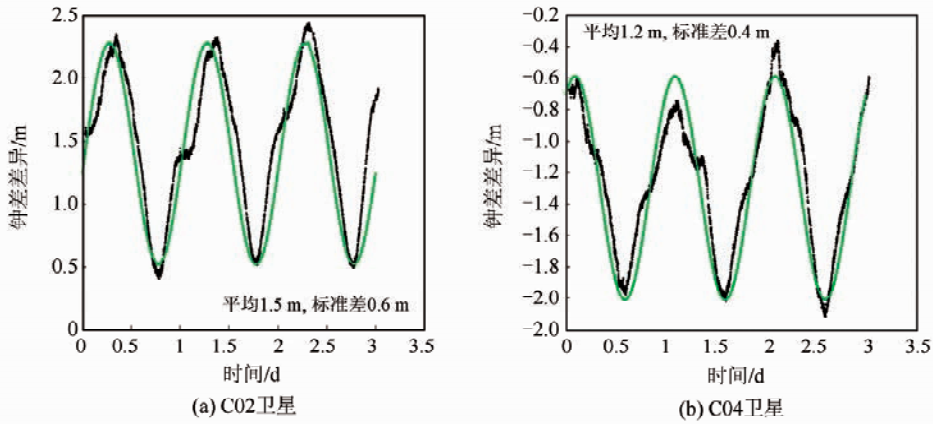


图 9 星地双向时间比对方法以及常规多星定轨获取卫星钟差的差异

Fig. 9 Differences of Satellite Clocks Obtained from Orbit Determination Process and Two Way Time Transfer Technique

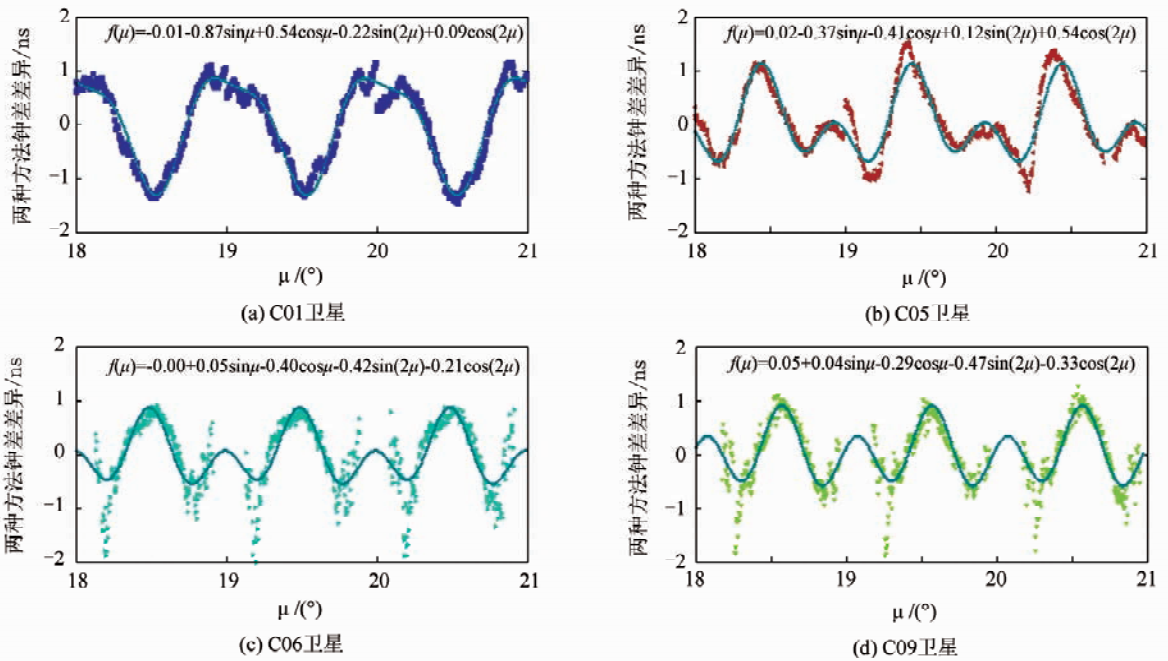


图 10 C01、C05、C06、C09 4 颗卫星星地双向时间比对方法以及常规多星定轨获取卫星钟差的差异

Fig. 10 Differences of Satellite Clocks Obtained from Orbit Determination Process and Two Way Time Transfer Technique, for Satellite C01, C05, C06 and C09

## 6 结 语

目前最高精度的 GNSS 数据处理仍然存在各种误差,本文分析了 IGS 各分析中心轨道、钟

差存在的显著周期性差异,得出了该差异中存在的各周期项的特征参数。通过改正该周期性误差,分析中心时空参数的一致性得到了显著提高。进一步分析表明,该周期项误差产生的原因在于目前常规 GNSS 数据处理模型中的轨道参数和

钟差参数的强相关。这也说明目前 GNSS 轨道以及钟差模型还存在没有模型化的误差,从而在定轨处理中卫星钟差参数将吸收部分轨道误差。

为实现轨道和钟差这两类时空参数解算精度提升,达到提高时空参数的精度的目标,需要进行参数的降相关处理。为实现 GNSS 精密数据处理中的时空基准参数降相关,可采取对卫星钟差参数进行建模的方法。该方法在一定时间段内,对钟差参数采用函数来拟合,并将函数模型的系数作为待估参数,与其他所有待求参数一起解算。该模型参数的引入,类似于常规 GNSS 数据处理中的对流层延迟参数(通常也定义为分段函数)。在求出模型参数之后,根据模型就可得到任意历元高精度的钟差。

为实现以上降相关处理,需要对数据处理中的所有站钟、星钟进行频率稳定性分析,确定分段函数的分段时长  $\tau$ 。对于外接氢钟的测站,由于其频率稳定性高,从而其间隔定义较长;而对于频率稳定度差的钟差,则可能仍然需要采用逐历元估计的方法。通过将钟差模型引入精密定轨定位,能够降低轨道、钟差的相关性,从而有望提高数据处理的精度。

此外,更高精度的 GNSS 时空基准确定还需要对卫星轨道和卫星钟差参数之外的其他待估计参数之间的相关性进行仔细分析,通过参数相关性分析方法优化 GNSS 数据处理的参数域设置,进一步提高 GNSS 时空基准确定的精度。

## 参 考 文 献

- [1] Gross R, Beutler G, Plag H P. Integrated Scientific and Societal User Requirements and Functional Specifications for the GGOSC[M]. Berlin: Springer, 2009
- [2] Altamimi Z, Sillard P, Boucher C. ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, DOI:10.1029/2001JB000561
- [3] Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J. ITRF2005: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Based on Time Series of Station Positions and Earth Orientation Parameters[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, DOI: 10.1029/2007JB004949
- [4] Altamimi Z. ITRF2014 and the IGS Contribution [C]. IGS Workshop, Sydney, 2016
- [5] Altamimi Z, Collilieux X. IGS Contribution to the ITRF[J]. *Journal of Geodesy*, 2009,83(3/4):375-383
- [6] Wiley B, Craig D, Manning D, et al. NGA's Role in GPS[C]. The 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Ft. Worth, TX, 2006
- [7] Vdovin V, Vinogradova M. National Reference Systems of the Russian Federation Used in GLO-NASS[C]. The 8th ICG Meeting, Dubai, 2013
- [8] Mazurova E, Kopeikin S, Karpik A. Development of a Terrestrial Reference Frame in the Russian Federation[J]. *Stud Geophys Geod*, 2017, 61: 1-23
- [9] Gendt G, Altamimi Z, Dach R, et al. GGSP: Realisation and Maintenance of the Galileo Terrestrial Reference Frame[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(2):174-185
- [10] Chen Junyong, Yang Yuanxi, Wang Ming, et al. Establishment of 2000 National Geodetic Control Network of China and its Technological Progress [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36:1-8 (陈俊勇,杨元喜,王敏,等. 2000 国家大地控制网的构建和它的技术进步[J]. *测绘学报*, 2007, 36:1-8)
- [11] Brown K. The Theory of the GPS Composed Clock [C]. ION GPS-91, Albuquerque, N M, 1991
- [12] Delporte J. The Definition and Implementation of Galileo System Time (GST)[R]. ICG-4 WG-D on GNSS Time Scales, Saint-petersburg, Russian, 2009
- [13] Wei Ziqing. The Coordinate System and Timing Scales in the GNSS System [C]. CSNC Conference, Beijing, 2010 (魏子卿. 卫星导航定位定时中的坐标系统与时间尺度问题[C]. 北斗导航年会,北京, 2010)
- [14] Rothacher M, Beutler G. The Role of GPS in the Study of Global Change[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998,23(9/10): 1 029-1 040
- [15] Chen J, Zhang Y, Wang J, et al. A Simplified and Unified Model of Multi-GNSS Precise Point Positioning[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55: 125-134
- [16] Yang Sainan, Chen Junping, Zhang Yize, et al. Study of Character of GPS/GLONASS Satellite Clock Correction Based on Least Square Spectral Analysis[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014(2):169-174 (杨赛男,陈俊平,张益泽,等. 基于最小二乘频谱分析的 GPS/GLONASS 卫星钟差特性研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2014(2): 169-174)
- [17] Huang Guanwen, Zhang Qin, Xu Guochang, et al. IGS Precise Satellite Clock Model Fitting and its Precision by Using Spectral Analysis Method[J].



- Geomatics and Information Science of Wunan University*, 2008,33(5): 496-499 (黄观文,张勤,许国昌,等. 基于频谱分析的 IGS 精密星历卫星钟差精度分析研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008,33(5): 496-499)
- [18] Hu Liying, Xiao Peng. Application of Fast Fourier Transform in Frequency and Spectrum Analysis[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2011(4):27-30(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)
- [19] Chen Junping, Wu Bin, Hu Xiaogong, et al. SHA: The GNSS Analysis Center at SHAO[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, 160: 213-221
- [20] Allan D W, Barnes J A. A Modified Allan Variance with Increased Oscillator Characterization Ability [C]. The 35th Annual Frequency Control Symposium, Philadelphia, P A, 1981
- [21] Liu Li. Relativistic Theory of Time Transfer and Techniques of Clock Synchronization [D]. Zhengzhou: Information Engineering university, 2004(刘利. 相对论时间比对原理与高精度时间同步技术 [D]. 郑州:信息工程大学,2004)
- [22] He Feng. Studies on Broadcast Ephemeris Fitting and Precise Orbit Determination Accuracy Improvement in Navigation System [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013(何峰. 导航系统广播星历拟合与精密定轨精度提升方法研究 [D]. 北京:中国科学院,2013)
- [23] Wang Bin. Analysis of BDS Satellite Clock in Orbit, Modelling and its Prediction Research [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016(王彬. BDS 在轨卫星钟特征分析、建模及预报研究 [D]. 武汉:武汉大学, 2016)

## Correlation of Spatial and Temporal Parameters in GNSS Data Analysis

CHEN Junping<sup>1,2</sup> ZHOU Jianhua<sup>3</sup> YAN Yu<sup>1,4</sup> CHEN Qian<sup>1,2</sup> WANG Bin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

<sup>2</sup> School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup> Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

<sup>4</sup> College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract:** A time system and reference frame are two fundamental parameters in a satellite navigation system (GNSS), which consists of coordinates and clocks of satellites and stations. A comparison of these precise parameters of IGS Analysis Center shows apparent differences. The differences include constant offsets and periodical signals, where the periodical signals of satellite orbits and satellite clocks are highly correlated. We analyzed the characteristics of the periodical signals and derived their amplitudes and frequencies. The derived periodical terms were applied for the correction of AC satellite orbits and clocks. The numbers of epochs where the agreement between AC precise products increased, amounted to 95.3% and 85.6% of all samples for orbits and clocks, respectively. Furthermore, the error in such signals was analyzed and strategies based on the parameter de-correlation are proposed for the GNSS precise data processing.

**Key words:** GNSS; orbits; clocks; correlation

**First author:** CHEN Junping, professor, specializes in satellite geodesy and geodynamics. E-mail: junping@shao.ac.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 11673050, 11403112; The National 863 Program of China, No. 2014AA123102.