



基于 Lomb-Scargle 谱分析的分析中心 GPS 精密产品特性分析及修正

侯阳飞^{1,2} 陈俊平^{2,3} 王彬² 王解先¹

(¹同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092)

(²中国科学院上海天文台, 上海 200030)

(³上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030)

摘要: 考虑到国际 GNSS 服务(IGS)提供的精密产品相对于全球大地测量观测系统(GGOS)时空基准准确度 1 mm 的要求仍存在量级差异,采用 Lomb-Scargle 谱分析算法分析了 GNSS 各分析中心精密产品与 IGS 最终精密产品之间的系统性偏差、周期性偏差,并在此基础上基于最小二乘法建立了偏差修正模型用于精密参数的修正. 偏差修正结果表明,修正后卫星钟差标准差平均减小 15.4%,卫星轨道径向标准差平均减小 33.3%,卫星轨道径向与钟差综合偏差的标准差平均减小 24.0%,同时空间信号测距误差也从 cm 量级降低至 mm 量级. 15 个测站的定位验证结果表明,偏差修正后使用单分析中心精密产品的定位误差与使用 IGS 最终精密产品定位误差的一致性有所提升,3 个分析中心的定位误差一致性平均提升比例为 14.3%,证明了该偏差修正模型能够有效提升 GNSS 各分析中心精密产品与 IGS 最终精密产品的一致性.

关键词: Lomb-Scargle 周期图;周期性偏差;系统性偏差;偏差修正模型

中图分类号: P228.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2020)05-0950-09

Characteristic analysis and correction of GPS precise products in analysis centers based on Lomb-Scargle periodogram

Hou Yangfei^{1,2} Chen Junping^{2,3} Wang Bin² Wang Jiexian¹

(¹ College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(² Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

(³ Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China)

Abstract: Considering that the precise orbit and clock products provided by international GNSS service (IGS) were of order of magnitude difference from those required by the global geodetic observing system (GGOS) in accuracy of 1 mm, the Lomb-Scargle periodogram was used to analyze the systematic deviation and the periodical deviation between the precise products of GNSS analysis centers (ACs) and the IGS final precision products. On this basis, a deviation correction model was established based on the least square method for the correction of precision parameters. The deviation correction results show that the standard deviation of the precise clock decreases by 15.4%, the standard deviation of the radial orbit decreases by 33.3%, and the standard deviation of the ensemble effects of radial orbit and clock decreases by 24.0% on average. The signal-in-space user ranging error (SISURE) also significantly decreases from the level of centimeters to millimeters. The positioning verification results of the 15 stations show that the consistency between the positioning errors of the precision products using single AC and the positioning errors of final precision products of IGS is also improved after the deviation correction, and the average improvement ratio of the positioning error consistency of three ACs is 14.3%. It is proved that the deviation correction model can effectively improve the consistency between the precision products of ACs and the final products of IGS.

Key words: Lomb-Scargle periodogram; periodical deviation; systematic deviation; deviation correction model

收稿日期: 2019-12-17. **作者简介:** 侯阳飞(1997—),男,博士生;陈俊平(联系人),男,博士,教授,博士生导师, junping@shao.ac.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11673050)、国家重点研发计划资助项目(2018YFB0504300)、大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGED2019-3-1-E).

引用本文: 侯阳飞,陈俊平,王彬,等. 基于 Lomb-Scargle 谱分析的分析中心 GPS 精密产品特性分析及修正[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(5): 950-958. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2020.05.022.

国际 GNSS 服务 (international GNSS service, IGS) 提供的高精度 GNSS 轨道和钟差产品已经成为各科研机构和应用机构的参照基准,以 GPS 卫星为例,IGS 发布的 GPS 卫星轨道后处理精度达到了 2.5 cm,钟差后处理精度达到了 75 ps (约 2.3 cm)^[1],这与 GGOS (global geodetic observing system) 时空基准准确度 1 mm 的要求还存在量级差异. IGS 的精密产品由各分析中心综合得到,其产品间的一致性对于后续的融合至关重要,也是用户进行高精度定位、导航的基本保障. 文献[2]研究表明,由于各分析中心存在动力学模型、观测台站、参数设置等不一致的情况,各分析中心解算得到的 GNSS 产品存在系统性偏差. 文献[3]研究了各分析中心精密产品间差异的周期特性,并分析了周期性偏差的产生原因. 目前各分析中心产品之间存在的系统以及周期性偏差也是制约 IGS 产品精度进一步提升的主要原因.

由于精密产品多是含噪的非均匀序列,因此采用快速傅里叶变换以及最小二乘频谱分析算法研究分析中心精密产品差异特性时均存在明显的缺点^[4-5]. 由 Lomb 发展,经过 Scargle 进一步完善的 Lomb-Scargle 傅里叶变换不仅能从时序序列中有效提取出弱周期信号,还可以在一定程度上减弱由时序序列的不均匀性产生的虚假信号,多个领域已经基于该算法取得了重要的研究成果^[6-13],鉴于此,本文主要采用 Lomb-Scargle 算法分析各分析中心精密产品的偏差特性.

本文采用欧洲空间局 (European Space Agency, ESA)、美国喷气动力实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL)、加拿大大地测量中心 (Geodetic Survey of Canada, EMR) 精密产品开展实验,对各分析中心精密轨道、精密钟差、精密轨道 + 钟差的偏差特性进行分析,同时基于最小二乘法建立偏差修正模型,并分析偏差修正模型对各分析中心精密产品偏差的均值、标准差、ALLAN 方差以及空间测距误差的影响,以证明本文建立的偏差修正模型的可靠性.

1 基于 Lomb-Scargle 周期图的频谱分析

为了对精密产品的周期性偏差进行分析,可以采用频谱分析算法对周期性参数进行提取. 常用的频谱分析算法主要有快速傅里叶变换频谱分析和最小二乘频谱分析,它们都有各自的优缺点. 快速傅里叶变换频谱分析是一种很常用的频

域分析法,其优点是能够很好地描述信号的频率特性,但是无法处理非均匀的数据序列,因为非均匀分布在进行傅里叶变换时会产生虚假信号,而本文需要分析的 IGS 精密产品通常是非均匀的. 最小二乘频谱分析对于非均匀序列可以直接进行分析,但是其需要更长的计算时间,且周期信号频率可能出现互相关.

对于时域序列 $X(t_j)$, $j=1, 2, \dots, N$, 其功率谱可定义为频率 f 的函数,即

$$P_x(f) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{\left[\sum_{j=1}^N X(t_j) \cos[2\pi f(t_j - \tau)] \right]^2}{\sum_{j=1}^N \cos^2[2\pi f(t_j - \tau)]} + \frac{\left[\sum_{j=1}^N X(t_j) \sin[2\pi f(t_j - \tau)] \right]^2}{\sum_{j=1}^N \sin^2[2\pi f(t_j - \tau)]} \right\} \quad (1)$$

式中, $P_x(f)$ 为频率为 f 的周期信号的功率; σ^2 为方差; τ 为时间平移不变量,该常量保证时间原点平移一个常数时,功率谱 $P_x(f)$ 保持不变; N 为独立周期. 频率中的功率 $P_x(f)$ 大于等于某一值 Z 的概率为 $P(P_x \geq Z) = e^{-Z}$. 假设 Z 为频谱中的最高峰,频谱中包含 N 个独立的周期,则某一个周期成分小于 Z 的概率为 $1 - e^{-Z}$,从而所有频率均小于 Z 的概率为 $(1 - e^{-Z})^N$,某一频率的能量大于等于 Z 的虚警概率为 $1 - (1 - e^{-Z})^N$,由此可得 Lomb-Scargle 算法的周期置信度.

2 精密产品频谱分析结果

取 IGS 及其分析中心 1 个月的精密轨道和精密钟差数据,采用 Lomb-Scargle 算法,针对不同分析中心精密产品的钟差偏差、轨道径向偏差、轨道径向与钟差综合偏差的周期特性进行深入分析.

2.1 数据预处理

由于 IGS 不同分析中心选用的钟差基准和坐标框架及模型不统一,因此同一颗卫星来自不同分析中心的精密轨道及钟差产品有所差异,在研究各分析中心精密产品的偏差特性之前,需要通过数据预处理消除这部分偏差.

不同 IGS 分析中心选取的参考钟不同,导致来自不同分析中心的同一颗卫星的精密钟差数据产生差异,这一差异反映了两分析中心之间的时间基准差异^[14]. 为了进行基准统一,本文选择所有卫星精密钟差差异的中位数作为基准扣除,这样能有效避免个别卫星钟差的粗差污染其他卫星比较的

结果. 处理过程可以表示如下:

$$\Delta T_i^j = \Delta T_{iAC}^j - \Delta T_{iIGS}^j \quad (2)$$

$$\Delta T_i^j = \Delta T_i^j - \Delta T_{imed} \quad (3)$$

式中, ΔT_{iAC}^j 表示分析中心的第 i 个历元第 j 颗卫星的钟差; ΔT_{iIGS}^j 表示 IGS 的第 i 个历元第 j 颗卫星的钟差; ΔT_i^j 表示分析中心与 IGS 在第 i 个历元第 j 颗卫星的钟差偏差; ΔT_{imed} 为进行“一次差”处理后钟差差异的中位数; ΔT_i^j 表示扣除中位数差异之后的钟差偏差.

对于 IGS 分析中心提供的精密轨道数据, 不同分析中心选取的坐标框架及模型不同, 导致其提供的卫星空间坐标存在差异. IGS 综合后的轨道产品与单个分析中心产品之间也同样存在系统性误差. 分析过程中, 将协议地固系下的卫星

坐标矢量转换到 RTN 坐标系下, 转换后得到的 R 分量即为卫星在其轨道平面内的径向值^[15]. 在同一历元下, 将 IGS 分析中心和 IGS 综合产品中的卫星精密轨道 R 分量数据作差, 消除系统性误差.

2.2 精密产品谱分析结果

精密产品中影响用户定位的主要分量是轨道径向和钟差, 而轨道径向与钟差存在强相关. 因此本文不仅分析了钟差偏差、轨道径向偏差的特性, 而且对各分析中心轨道径向与钟差综合偏差的特性也进行分析. 结果表明, 从 3 个分析中心精密产品的频谱分析中探测出了相同的周期信号. 以 ESA 的 G13 星和 EMR 的 G05 卫星为例, 精密产品频谱分析结果如图 1 所示.

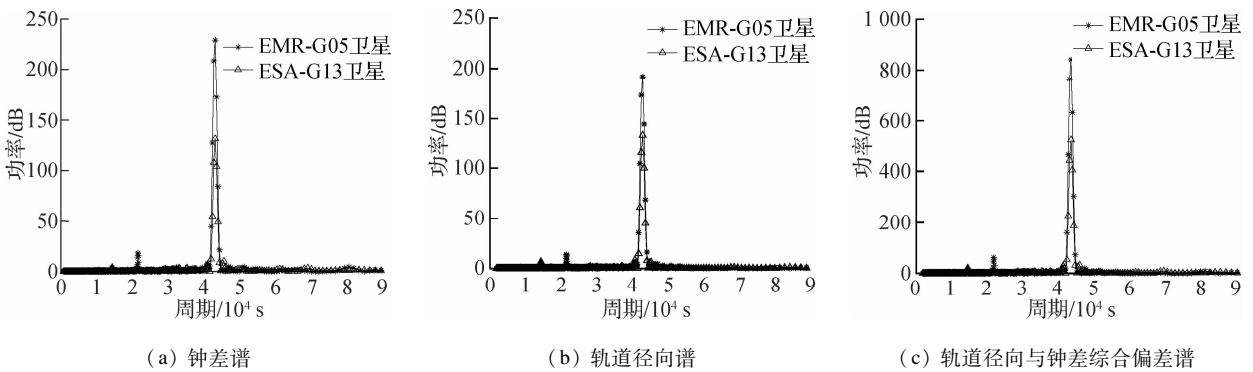


图 1 精密产品频谱分析结果

可以看出, 不同分析中心的精密产品相对偏差存在显著的周期性差异, 均在 4.32×10^4 s 附近出现峰值.

统计 3 个分析中心所有卫星钟差偏差、轨道径向偏差、轨道径向与钟差综合偏差主周期的均值以及标准差, 统计结果如图 2 所示.

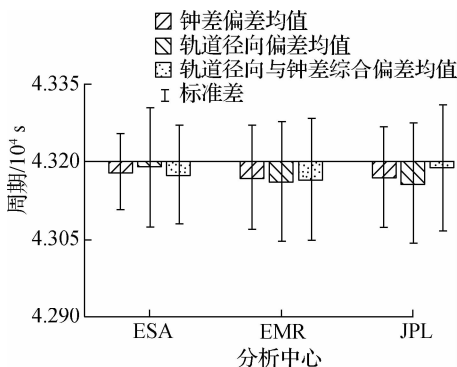


图 2 3 个分析中心频谱分析主周期均值及标准差

从图 1 和图 2 可以看出, 各分析中心精密钟差产品与 IGS 综合产品的差异存在 4.32×10^4 s 左右

的周期性偏差, 与 GPS 卫星的运行周期十分接近, 因此可以认为这一周期性偏差与 GPS 卫星自身的运动有关.

3 偏差修正模型的建立及应用

根据频谱分析结果, 钟差偏差、轨道径向偏差、轨道径向与钟差综合偏差均存在 4.32×10^4 s 左右的周期性偏差, 本节针对频谱分析结果, 建立偏差修正模型以消除分析中心精密产品与 IGS 最终产品之间的系统性偏差与周期性偏差.

3.1 偏差修正模型的建立

根据傅里叶分析的基本原理, 建立如下偏差修正模型:

$$Y'(t) = Y(t) - a_0 - a_i \sin(2\pi f_i t) - b_i \cos(2\pi f_i t) \quad (4)$$

式中, $Y'(t)$ 为修正后系统性偏差和周期性偏差的序列; $Y(t)$ 为原始偏差序列; a_0 为待求系统性偏差; a_i 、 b_i 为待求周期性偏差系数; f_i 为待求周期对应的频率.

若已知有 n 个数据的序列 $\{Y(t)\}$, 其中 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 则式(4)可写为

$$\begin{bmatrix} Y'(t_1) \\ Y'(t_2) \\ \vdots \\ Y'(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(t_1) \\ Y(t_2) \\ \vdots \\ Y(t_n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & \sin(2\pi f_i t_1) & \cos(2\pi f_i t_1) \\ 1 & \sin(2\pi f_i t_2) & \cos(2\pi f_i t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \sin(2\pi f_i t_n) & \cos(2\pi f_i t_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_i \\ b_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

将上式看成 $Y = BX$, 其中

$$X = [a_0 \quad a_i \quad b_i] \quad (6)$$

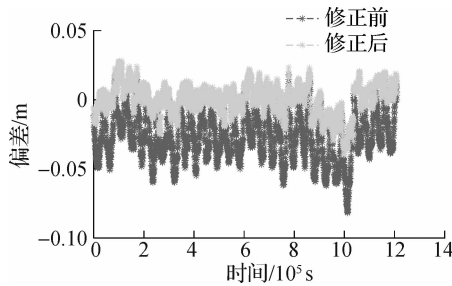
进而可以利用最小二乘法求出上述参数.

3.2 基于偏差模型的产品差值

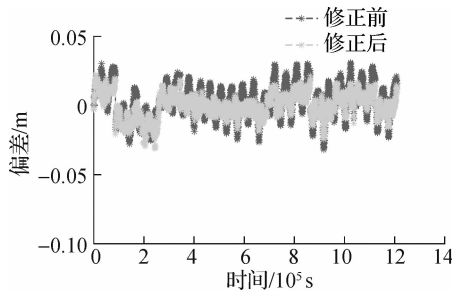
利用 3.1 节中建立的偏差修正模型, 分别对精密钟差偏差、精密轨道径向偏差、精密轨道径向与钟差综合偏差的系统性及周期性偏差进行消除, 并通过偏差修正前后的均值、标准差以及 ALLAN 方差等参数对所建立的偏差修正模型进行分析评估.

3.2.1 精密钟差偏差修正结果

以 ESA 的 G04 卫星和 JPL 的 G23 卫星为例, 分析经偏差模型修正后精密钟差偏差的相对变化, 如图 3 所示.



(a) ESA-G04 卫星



(b) JPL-G23 卫星

图 3 偏差修正前后钟差偏差的变化

从图 3 可以看出, 采用所建立的模型进行系统性偏差以及周期性偏差修正后, 钟差偏差的振幅以及均值均有所减小. 以 ESA 分析中心为例, 进一步统计所有卫星的钟差偏差均值以及标准差变化情况, 统计结果如图 4 所示.

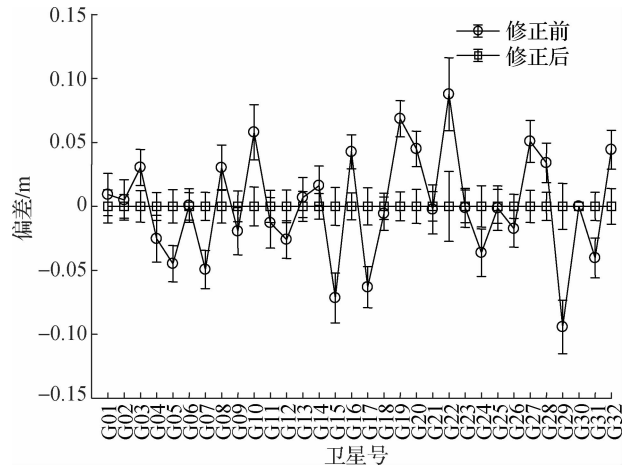


图 4 ESA 分析中心偏差修正前后的钟差偏差均值及标准差

从图 4 可以看出, 经过系统性偏差以及周期性偏差修正, 钟差偏差的均值变为零, 并且标准差显著减小, 这表明经偏差修正后, 精密钟差的一致性显著提高. 统计所有卫星标准差的减小比例, 其结果如图 5 所示.

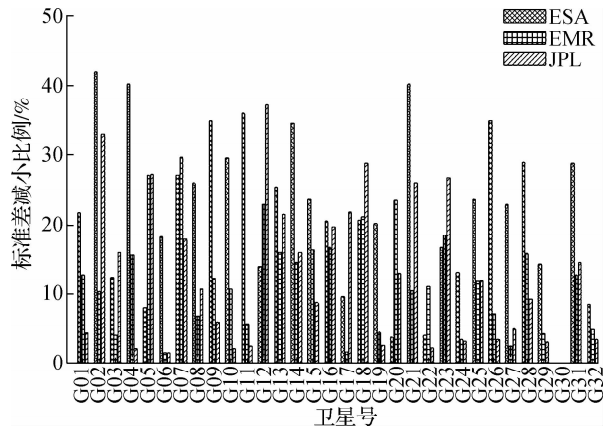


图 5 所有卫星的钟差偏差标准差减小比例

从图 5 可以看出, 经过偏差模型修正后, 3 个分析中心的钟差偏差均显著减小, ESA 钟差偏差的标准差减小比例最大, 达到了 22.2%, EMR、JPL 钟差偏差的标准差减小比例接近, 分别为 11.7% 和 12.4%, 平均减小 15.4%. 进一步分析系统性和周期性偏差修正前后的 ALLAN 标准差, 以 ESA 的 G04 卫星和 JPL 的 G23 卫星为例, 结果如图 6 所示.

所有卫星的修正结果与图 6 一致. 由图 6 可知, 偏差修正后, 1×10^4 s 左右之后的 ALLAN 标准差发生明显变化, 这进一步说明了系统性和周期性偏差确实存在, 并且影响了 1×10^4 s 之后的 ALLAN 标准差. 总体而言, 进行偏差修正后, ALLAN 标准差整体更为稳定.

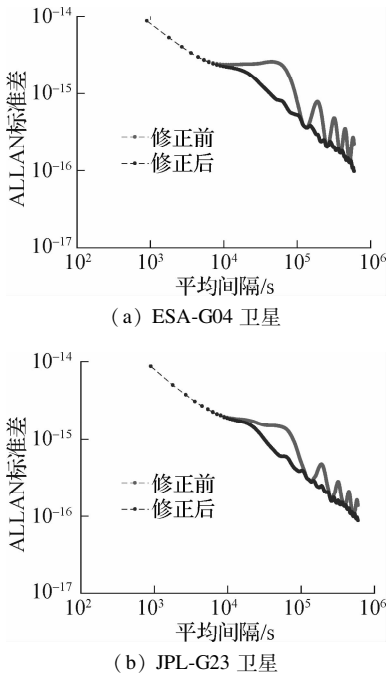


图 6 偏差修正前后钟差偏差的 ALLAN 标准差变化

心为例,所有卫星的均值及标准差变化情况如图 8 所示.

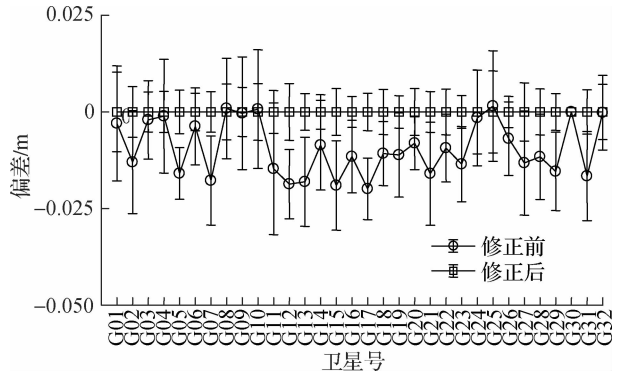


图 8 偏差修正前后 ESA 分析中心轨道径向偏差均值及标准差

可以看出,经偏差修正后轨道径向偏差的一致性也得到提高,统计所有卫星轨道径向偏差标准差的减小比例,统计结果如图 9 所示.

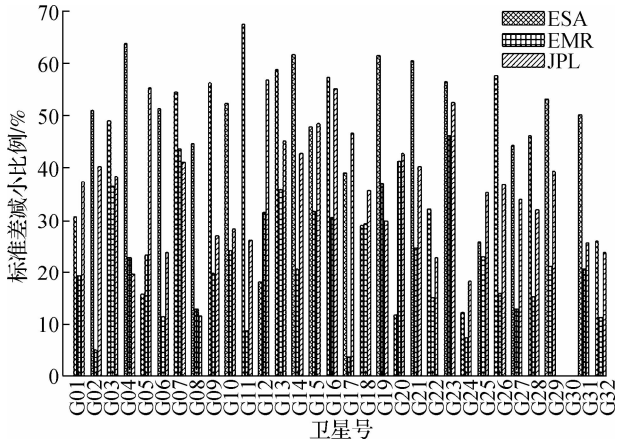


图 9 所有卫星的轨道径向偏差标准差减小比例

经过偏差修正后,3 个分析中心所有卫星的轨道径向偏差均有所减小,且相较于精密钟差减小比例更大,ESA 分析中心的轨道径向偏差标准差减小比例最大,平均达 43.3%,JPL 分析中心次之,减小比例达 34.7%,EMR 分析中心最小,减小了 22.0%,平均减小 33.3%.分析轨道径向偏差的 ALLAN 标准差变化,以 ESA 的 G04 卫星和 JPL 的 G23 卫星为例,ALLAN 标准差变化结果如图 10 所示.

所有卫星的 ALLAN 标准差变化结果与图 10 一致.结果表明,偏差修正后,0.3 × 10⁴ s 之后的 ALLAN 标准差发生明显变化,与精密钟差一致,说明了精密轨道中系统性和周期性偏差也同样存在.

3.2.2 精密轨道径向偏差修正结果

以 ESA 的 G04 卫星和 JPL 的 G23 卫星为例,分析经偏差模型修正后轨道径向偏差的相对变化,如图 7 所示.

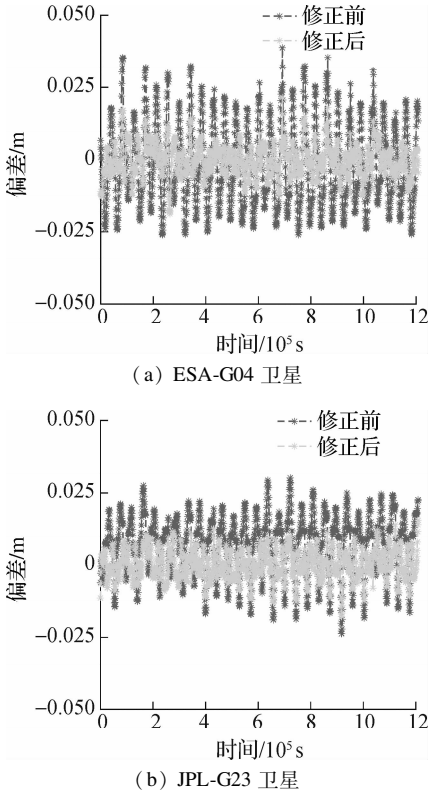


图 7 偏差修正前后轨道径向偏差的变化

与钟差结果类似,经过偏差修正后轨道径向偏差显著减小,且偏差的均值变为零,以 ESA 分析中

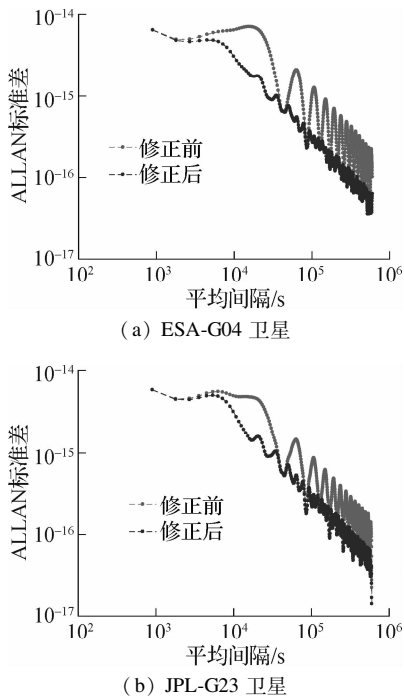


图 10 偏差修正前后轨道径向的 ALLAN 标准差变化

中心为例,统计偏差修正前后所有卫星的轨道径向与钟差综合偏差的均值及标准差,统计结果如图 12 所示.

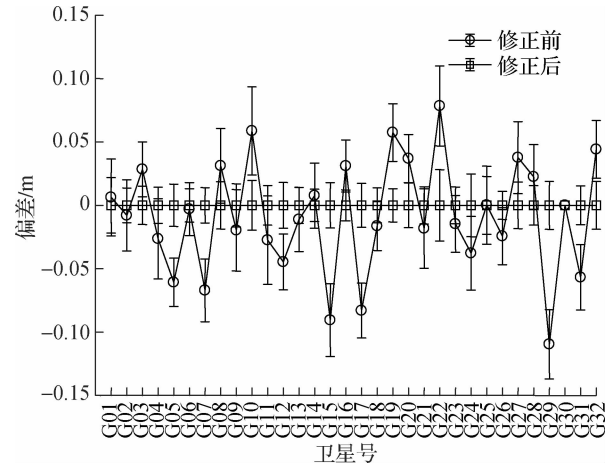


图 12 偏差修正前后 ESA 分析中心轨道径向与钟差综合偏差均值及标准差

其他分析中心的结果与图 12 类似,经过偏差修正后,所有卫星的轨道径向与钟差综合偏差的均值为零,且标准差也显著减小,一致性得到提高.进一步统计所有卫星的轨道径向与钟差综合偏差标准差减小比例,如图 13 所示.

3.2.3 精密轨道径向与钟差综合偏差修正结果

以 ESA 的 G04 卫星和 JPL 的 G23 卫星为例,分析经偏差模型修正后轨道径向与钟差综合偏差的相对变化,如图 11 所示.

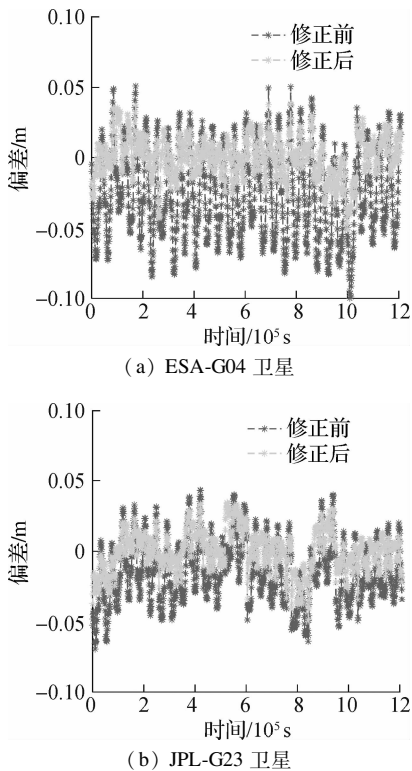


图 11 偏差修正前后轨道径向与钟差综合偏差的变化

从图 11 可以看出,偏差修正前后轨道径向与钟差综合偏差的一致性也得到提高.以 ESA 分析

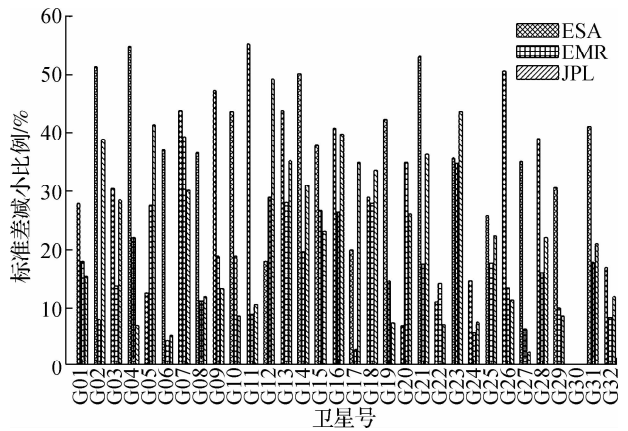
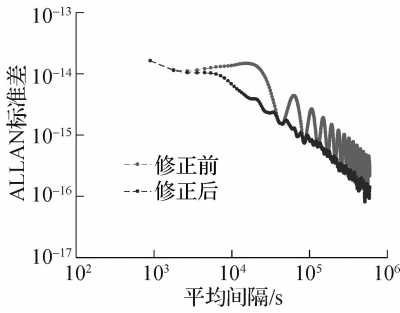


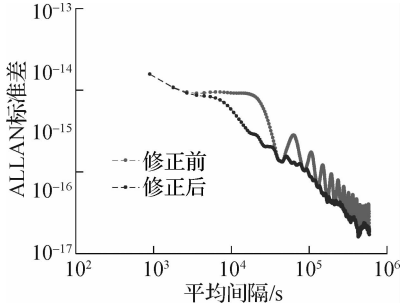
图 13 所有卫星的轨道径向与钟差综合偏差标准差减小比例

由图 13 可以看出,所有卫星的标准差均有所减小,这反映了所建立的偏差修正模型可以显著提高各分析中心轨道径向与钟差综合偏差的一致性,ESA、EMR、JPL 的标准差减小比例分别为 33.8%、17.5% 和 20.7%,平均减小 24.0%.进一步分析精密轨道径向与钟差综合偏差的 ALLAN 标准差的变化,以 ESA 的 G04 卫星和 JPL 的 G23 卫星为例,结果如图 14 所示.

其他卫星结果类似,由图 14 可以看出,精密轨道径向与钟差综合偏差经过修正后, 0.3×10^{-4} s



(a) ESA-G04 卫星



(b) JPL-G23 卫星

图 14 偏差修正前后轨道径向与钟差综合偏差的 ALLAN 标准差变化

之后的 ALLAN 标准差显著减小,说明了偏差修正可以显著提升不同分析中心精密产品与 IGS 最终产品的一致性.

3.2.4 空间信号测距误差偏差修正结果

空间信号测距误差(signal-in-space user ranger error, SISURE)是指卫星实际位置和钟差与广播星历之间差异的综合,它反映了卫星轨道和钟差的整体误差,本文将用于评定 IGS 各个分析中心精密产品的一致性,其计算公式为

$$S = \sqrt{(\alpha R - T)^2 + \beta (A + C)^2} \quad (7)$$

式中, S 为空间信号测距误差; R 、 A 、 C 分别为轨道径向偏差的径向、切向以及法向分量; T 为钟差偏差; α 、 β 为各方向的投影系数,对于 GPS 卫星来说,一般分别取值为 0.98 和 1/49^[16].

对上述精密产品进行系统性以及周期性偏差修正,修正后各分析中心的空间信号测距误差统计结果如表 1 所示.

从表 1 可看出,对系统性以及周期性偏差进行修正后,各分析中心精密产品的空间信号测距误差显著降低,ESA 的空间信号测距误差为 0.009 m,EMR 的空间信号测距误差为 0.009 m,JPL 的空间信号测距误差为 0.010 m.进一步统计偏差修正前后所有分析中心空间信号测距误差减小比例,如图 15 所示.

表 1 偏差修正后各分析中心所有卫星的 SISURE m

卫星号	ESA	EMR	JPL
G01	0.0072	0.0065	0.0132
G02	0.0067	0.0091	0.0047
G03	0.0089	0.0102	0.0046
G04	0.0073	0.0098	0.0085
G05	0.0093	0.0072	0.0101
G06	0.0078	0.0107	0.0145
G07	0.0082	0.0058	0.0096
G08	0.0082	0.0072	0.0045
G09	0.0070	0.0102	0.0127
G10	0.0111	0.0158	0.0153
G11	0.0100	0.0072	0.0060
G12	0.0083	0.0091	0.0059
G13	0.0089	0.0087	0.0054
G14	0.0070	0.0076	0.0043
G15	0.0102	0.0133	0.0155
G16	0.0077	0.0112	0.0087
G17	0.0111	0.0075	0.0069
G18	0.0077	0.0096	0.0042
G19	0.0090	0.0094	0.0186
G20	0.0093	0.0100	0.0151
G21	0.0078	0.0089	0.0045
G22	0.0225	0.0114	0.0224
G23	0.0098	0.0113	0.0060
G24	0.0093	0.0103	0.0199
G25	0.0063	0.0098	0.0151
G26	0.0075	0.0099	0.0110
G27	0.0076	0.0108	0.0219
G28	0.0069	0.0077	0.0111
G29	0.0139	0.0151	0.0216
G30			
G31	0.0072	0.0098	0.0040
G32	0.0091	0.0119	0.0088

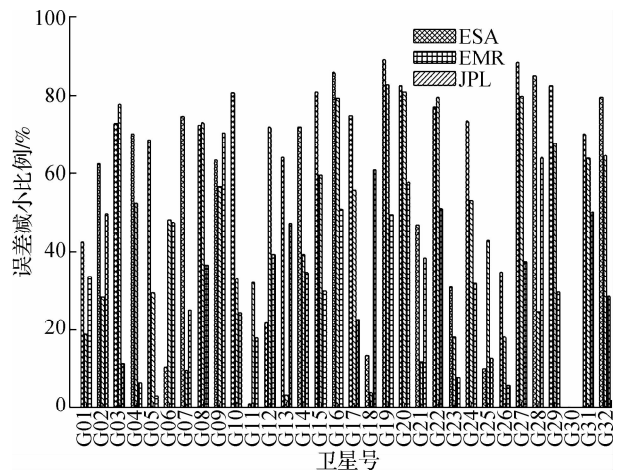


图 15 所有卫星的空间信号测距误差减小比例

经过偏差模型修正后,3 个分析中心所有卫星的空间信号测距误差均显著减小,从 cm 量级降低到 mm 量级.ESA、EMR 以及 JPL 的减小比例分别为 58.6%、45.5%、33.5%.整体来看,JPL 分析中心的空间信号测距误差最小.

3.3 偏差修正对 PPP 定位的影响

从全球选取 15 个测站连续 1 个月的观测数据进行静态 PPP 定位验证,定位时分别采用 IGS 最终精密产品以及各分析中心偏差修正前后的精密产品.并将各分析中心产品的定位结果与 IGS 产品的定位结果进行对比.

以 ESA 为例,将使用 IGS 精密产品的定位结果作为基准,统计 15 个测站共计 30 d 偏差修正前后定位结果相对于 IGS 定位结果的三维误差均值,结果如图 16 所示.

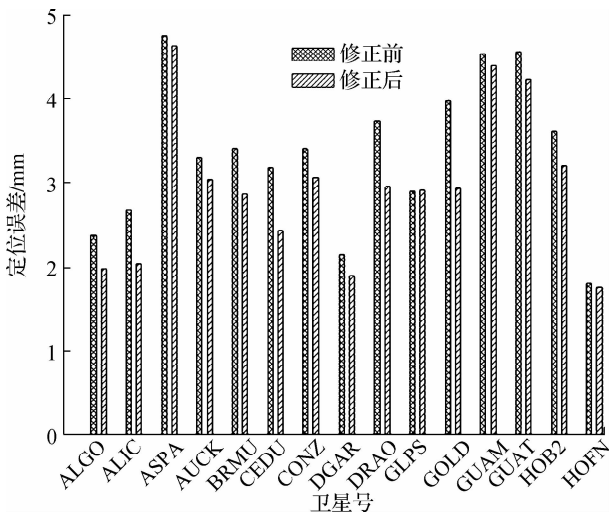


图 16 偏差修正前后 ESA 定位结果相对于 IGS 结果的误差

从图 16 可以看出,偏差修正后使用单分析中心精密产品的定位误差与使用 IGS 精密产品的定位误差的一致性有所提升,3 个分析中心的定位误差一致性平均提升比例为 14.3%.

4 结论

1) 基于 Lomb-Scargle 算法的频谱分析结果表明,3 个分析中心的钟差偏差、轨道径向偏差以及轨道径向与钟差综合偏差均存在 4.32×10^{-4} s 左右的周期性差异,这主要与 GPS 卫星的运行周期有关.

2) 本文基于频谱分析结果建立了相应的偏差修正模型,经过模型修正后,钟差偏差、轨道径向偏差以及轨道径向与钟差综合偏差的系统性误差以及周期性误差均得到有效消除,各项偏差均趋向于零均值,钟差标准差平均减小 15.4%,轨道径向标准差平均减小 33.3%,轨道径向与钟差综合偏差平均减小 24.0%. 偏差修正前后精密产品的 AL-LAN 标准差也发生明显变化,这也进一步证明了相应偏差的存在.

3) 经过偏差修正后,3 个分析中心精密产品的空间信号测距误差也显著减小,从 cm 量级降低至 mm 量级,ESA 的空间信号测距误差减小比例为 58.6%,EMR 的减小比例为 45.5%,JPL 的减小比例为 33.5%,各分析中心精密产品一致性得到显著提升.

4) 偏差修正后使用单分析中心精密产品的定位误差与使用 IGS 精密产品的定位误差的一致性有所提升,3 个分析中心的定位误差一致性平均提升比例为 14.3%.

参考文献 (References)

- [1] 杨赛男,陈俊平,曹月玲,等. 空间信号精度的算法设计与实验分析[J]. 天文学进展, 2015, 33(2): 250-258.
Yang S N, Chen J P, Cao Y L, et al. Calculation and analysis of signal-in-space accuracy[J]. *Progress in Astronomy*, 2015, 33(2): 250-258. (in Chinese)
- [2] 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, 42(11): 1649-1657. DOI: 10.13203/j.whugis20170278.
Chen J P, Zhou J H, Yan Y, et al. Correlation of spatial and temporal parameters in GNSS data analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1649-1657. DOI: 10.13203/j.whugis20170278. (in Chinese)
- [3] 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. DOI: 10.13203/j.whugis2009.11.009.
Wei N, Shi C, Li M, et al. Analysis and assessments of IGS products consistencies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1363-1367. DOI: 10.13203/j.whugis2009.11.009. (in Chinese)
- [4] 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, 34(2): 169-174. DOI: 10.14075/j.jgg.2014.02.015.
Yang S N, Chen J P, Zhang Y Z, et al. Study of character of GPS/GLONASS satellite clock correction based on least square spectral analysis[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(2): 169-174. DOI: 10.14075/j.jgg.2014.02.015. (in Chinese)
- [5] 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. DOI: 10.13203/j.whugis2008.05.009.
Huang G W, Zhang Q, Xu G C, et al. IGS precise satellite clock model fitting and its precision by using spec-

- tral analysis method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, **33**(5): 496–499. DOI:10.13203/j.whugis2008.05.009. (in Chinese)
- [6] 沈博, 刘二小, 黄成, 等. 基于 Lomb-Scargle 算法的中山站高频雷达目标回波的周期性特征研究[J]. *数字技术与应用*, 2018(5): 137–139. DOI:10.19695/j.cnki.cn12-1369.2018.05.66.
- Shen B, Liu E X, Huang C, et al. The period of polar mesosphere summer echoes observed by SuperDARN Zhongshan radar based on Lomb-Scargle algorithm[J]. *Digital Technology and Application*, 2018(5): 137–139. DOI:10.19695/j.cnki.cn12-1369.2018.05.66. (in Chinese)
- [7] Borrello J A, Wuosmaa A, Watts M. Non-dependence of nuclear decay rates of ^{123}I and $^{99\text{m}}\text{Tc}$ on Earth-Sun distance[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2018, **132**:189–194. DOI: 10.1016/j.apradiso.2017.12.006.
- [8] Quinn B G. Regression, the periodogram, and the Lomb-Scargle periodogram [C]// *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Shanghai, China, 2016: 4313–4317.
- [9] Wang X L, Zhang Q, Zhang S C. Water levels measured with SNR using wavelet decomposition and Lomb-Scargle periodogram [J]. *GPS Solutions*, 2018, **22**(1): 22. DOI:10.1007/s10291-017-0684-8.
- [10] Ruf T. The Lomb-Scargle periodogram in biological rhythm research: Analysis of incomplete and unequally spaced time-series [J]. *Biological Rhythm Research*, 1999, **30**(2): 178–201. DOI:10.1076/brhm.30.2.178.1422.
- [11] van Dongen H P A, Olofsen E, van Hartevelt J H, et al. A procedure of multiple period searching in unequally spaced time-series with the Lomb-Scargle method [J]. *Biological Rhythm Research*, 1999, **30**(2): 149–177. DOI:10.1076/brhm.30.2.149.1424.
- [12] VanderPlas J T, Ivezić Ž. Periodograms for multiband astronomical time series [J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, **812**(1): 18. DOI:10.1088/0004-637x/812/1/18.
- [13] Blume C, Lechinger J, Santhi N, et al. Significance of circadian rhythms in severely brain-injured patients. A clue to consciousness? [J]. *Neurology*, 2017, **88**(20): 1933–1941. DOI: 10.1212/wnl.0000000000003942.
- [14] Chen J P, Zhang Y Z, Zhou X H, et al. GNSS clock corrections densification at SHAO: From 5 min to 30 s [J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2014, **57**(1): 166–175. DOI:10.1007/s11433-013-5181-7.
- [15] 常家超, 尚琳, 李国通, 等. 北斗系统地固系自主定轨算法[J]. *宇航学报*, 2018, 39(5): 532–540.
- Chang J C, Shang L, Li G T, et al. The autonomous orbit determination algorithm in earth-centered earth-fixed reference frame of Beidou system [J]. *Journal of Astronautics*, 2018, **39**(5): 532–540. (in Chinese)
- [16] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: A multi-GNSS perspective [J]. *GPS Solutions*, 2015, **19**(2): 321–333. DOI:10.1007/s10291-014-0390-8.