

李浩思, 邓琼, 徐鹏等. 2023. 低低跟踪重力卫星高精度微波测距系统数据预处理与分析. 地球物理学报, 66(5):1945-1959, doi:10.6038/cjg2022Q0227.

Li H S, Deng Q, Xu P, et al. 2023. Data preprocessing and analysis of high-precision microwave ranging system for low-low satellite-to-satellite tracking mission. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 66(5):1945-1959, doi:10.6038/cjg2022Q0227.

# 低低跟踪重力卫星高精度微波测距系统数据预处理与分析

李浩思<sup>1,2</sup>, 邓琼<sup>3</sup>, 徐鹏<sup>2,3,4\*</sup>, 强丽娥<sup>5</sup>, 王长青<sup>6</sup>, 肖云<sup>7\*</sup>,  
鲁宝亮<sup>1</sup>, 韦禹肖<sup>1</sup>, 陈道雨<sup>1</sup>

1 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710064

2 中国科学院力学研究所, 北京 100190

3 兰州大学兰州理论物理中心, 兰州 730000

4 中国科学院大学杭州高等研究院, 杭州 310024

5 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

6 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430071

7 西安测绘研究所, 西安 710054

**摘要** 本文研究低低跟踪重力卫星任务核心微波测距系统的数据预处理与分析方法, 实现关键载波频率不稳定性噪声的高效抑制, 以及相关干扰、偏差的消除和矫正. 依据理论分析成果, 研发了相关处理与分析程序. 本研究所完成的双频双向单程测距数据产品与 GRACE Follow-On 官方产品的残差远小于载荷设计精度指标, 满足重力场反演的精度需求. 针对最终数据产品中电子学噪声、系统噪声等噪声, 讨论评估与分析方法. 本文通过引入电离层自由电子含量的空间非均匀性的频域分析方法, 利用星间微波测距数据, 实现针对自由电子含量的不同空间尺度变化行为及其全球分布特征的分析能力, 从新视角为电离层的深入研究提供数据支撑. 本研究可为我国低低跟踪重力卫星任务微波测距系统的数据预处理与分析提供相关技术积累和参考.

**关键词** 重力卫星; 星间微波测距; 预处理; 噪声分析; 电离层

doi:10.6038/cjg2022Q0227

中图分类号 P228, P223

收稿日期 2022-04-05, 2023-03-04 收修定稿

## Data preprocessing and analysis of high-precision microwave ranging system for low-low satellite-to-satellite tracking mission

LI HaoSi<sup>1,2</sup>, DENG Qiong<sup>3</sup>, XU Peng<sup>2,3,4\*</sup>, QIANG LiE<sup>5</sup>, WANG ChangQing<sup>6</sup>,  
XIAO Yun<sup>7\*</sup>, LU BaoLiang<sup>1</sup>, WEI YuXiao<sup>1</sup>, CHEN DaoYu<sup>1</sup>

1 School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710064, China

2 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3 Lanzhou Center for Theoretical Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

4 Hangzhou Institute for Advanced Study of University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China

5 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

6 Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

7 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

**Abstract** This paper studies the data preprocessing and analysis methods of the key microwave

**基金项目** 国家重点研发计划(2021YFC2201901), 国家自然科学基金项目(11905017, 42174103), 中国科学院战略性先导科技专项(XDA1502110202-02)资助.

**第一作者简介** 李浩思, 男, 主要从事重力卫星、空间引力波探测数据分析. E-mail: 2020126009@chd.edu.cn

\* **通讯作者** 徐鹏, 男, 博士, 研究员, 主要从事重力卫星、空间引力波探测数据分析, 引力波物理等研究. E-mail: xupeng@imech.ac.cn

肖云, 男, 博士, 研究员, 主要从事卫星重力测量理论与方法研究. E-mail: powaterssg@qq.com

ranging system for the low-low satellite-to-satellite tracking gravity mission, and achieve the efficient suppression of the key carrier frequency noise, as well as the elimination and correction of the related interference and deviation. According to the theoretical analysis results, relevant processing and analysis procedures are developed. The residual between the dual one-way ranging data product completed by this research and the official product of GRACE Follow-On is much smaller than the design requirement of the payload, which meets the accuracy requirements of gravity field inversion. Evaluation and analysis methods for electronic noise, system noise and other noise in the final data product are discussed. In this paper, by introducing the frequency-domain analysis method of the spatial inhomogeneity of the ionospheric free electron content, and using the inter-satellite microwave ranging data, the ability to analyse the variation behaviour of free electron content at different spatial scales and its global distribution characteristics is realized, providing data support for the in-depth study of the ionosphere. This research can provide relevant technical accumulation and reference for the data preprocessing and analysis of the microwave ranging system for low-low satellite-to-satellite tracking missions of China.

**Keywords** Satellite gravity; Inter-satellite microwave ranging; Preprocessing; Noise analysis; Ionosphere

## 0 引言

重力场是地球的基本物理场,其空间分布与时间演化反映了地球系统中各组分的质量分布、结构构造以及迁移等重要信息,同时,重力场制约着地球外部空间物体的飞行运动.因此,地球重力场的精密测量对地球物理、水文、海洋、气候与环境等领域的研究至关重要,同时也为航空、水下导航、飞行器发射、制导与返回等提供了基础性支撑保障.自20世纪70年代起,为获得全球范围高精度、高分辨率、高一一致性以及均匀分布的重力场测量数据,国际研究团队投入了巨大的人力物力,致力于地球重力卫星任务的研发.随着技术的逐步成熟,21世纪以来,国际上先后发射了高低跟踪 CHAMP(Challenging Minisatellite Payload)任务(Reigber et al., 2002)、高低跟踪结合低低跟踪 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)任务(Tapley et al., 2004)、以及高低跟踪结合梯度测量的 GOCE(Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer)任务(Rummel and Gruber, 2010)等基于不同测量模式的重力卫星任务.相比于传统地面重力勘探、航测以及卫星雷达测高等技术,重力卫星任务提供了不可替代的互补性的探测手段.

采用低低跟踪测量模式的 GRACE 近地极轨双星任务,基于其核心 K 波段微波星间测距(KBR, K-band Ranging)数据产品以及卫星非保守力扰动

测量数据产品,均衡兼顾重力场测量的精度和时效性,在全球时变重力场反演中展现出巨大的优势. GRACE 卫星自2002年发射直至2017年任务结束的15年间,持续发布月平均全球时变重力场数据产品,支撑了大量的地球科学研究.为延续地球时变重力场监测的宝贵数据,同时验证下一代重力卫星任务以及空间引力波探测任务的星间激光干涉技术, GRACE 卫星的后续任务 GRACE Follow-On (GFO)于2018年成功发射(Kornfeld et al., 2019),目前处于科学运行阶段.美国 NASA 的喷气推进实验室(JPL, Jet Propulsion Laboratory)和德国地学中心(GFZ, German Research Center for Geosciences)基于科学高效的数据处理流程和成熟的数据产品管理规范,在过去的十几年里以固定的周期发布 GRACE 与 GFO 的 L1 级载荷预处理数据产品和 L2 级科学数据产品(Ince et al., 2019).以上数据产品在地球科学、海洋科学、全球气候变迁以及环境科学等研究领域产生了大量的科研成果(Han et al., 2006; 钟敏等, 2009; Tapley et al., 2019),尤其在我国区域地下水储量监测与消耗评估等民生相关的重大问题研究中起到了不可替代的作用(冯伟等, 2012, 2017).月球重力场反演任务 GRAIL(Gravity Recovery and Interior Laboratory)采用相同的测量模式,成功实现了月球千阶重力场球谐系数和低阶勒夫数的测量(Wieczorek et al., 2013).考虑到重力卫星的巨大应用价值以及低低跟踪测量模式的显著优势,国际国内主流的下一代重力卫星任

务,如欧美国家的 NGGM(Next Generation Gravity Mission)以及我国天琴二号任务等(Luo et al., 2016; Bacchetta et al., 2017; Milyukov et al., 2020),均围绕低低跟踪模式的近地轨道双星任务概念,结合激光干涉测距、无拖曳控制等先进技术(Sheard et al., 2012),积极开展论证与攻关工作(Shen et al., 2018; Gong et al., 2021)。

低低跟踪重力卫星任务的核心测量数据是高精度星间有偏测距数据(以及星间测速、星间加速度等导出数据),GRACE、GFO 以及 GRAIL 任务配置 KBR 系统以实现上述测量。但是,由于星载高精度时钟的不稳定性,在星间单程微波有偏测距中,微波载波频率不稳定性引起的噪声在测量频带达到了  $\sim \text{cm}/\text{Hz}^{1/2}$  的水平,远高于测距精度的指标需求  $\sim \mu\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ 。卫星姿态抖动引起双星 KBR 天线相位中心之间距离发生变化,从而产生与姿态耦合的测距噪声。同时,电离层中自由电子密度的不均匀性干扰测量频段内的微波相位。因此,在数据预处理过程中实现测量频带内对载波频率不稳定噪声的高效消除,以及对姿态、电离层等干扰的准确修正,获得双星质心之间的高精度有偏星间距数据产品,是保证低低跟踪重力卫星任务重力场反演精度和科学产出的关键环节,其有效性将直接影响最终科学数据产品的结果、质量以及置信度(肖云等, 2006, 2007; 冉将军等, 2014; 王长青等, 2015; 罗志才等, 2016)。由此,在国外相关任务有效载荷原始数据和预处理技术文档相对封闭的背景下,KBR 系统数据预处理的研究成为我国低低跟踪重力卫星任务研制前期地面系统科研攻关的主要内容之一。探究 GRACE、GFO 以及 GRAIL 等成功重力卫星任务 KBR 系统的数据预处理过程,尤其是涉及噪声抑制与消除的 L1A 至 L1B 级数据处理过程,并重建上述任务的高精度星间测距数据产品,将进一步加深对载荷之间的相互匹配,噪声的来源、传递、滤除,以及载荷各项技术指标对探测性能制约的认知,加深对低低跟踪重力卫星整体运行的理解,为我国低低跟踪重力卫星任务地面系统储备数据预处理方面的关键技术。

同时,低低跟踪重力卫星 KBR 测距系统与空间引力波探测任务超高精度星间激光干涉测距系统在测量原理,主导噪声以及噪声源分布上具有高度相似性。参考太极计划与天琴计划任务概念(Hu and Wu, 2017; Luo et al., 2016),KBR 有偏测距数据的预处理技术也具有高度的技术继承性。例如,针对关键载波频率不稳定性噪声的处理,KBR 系统

数据预处理中双向单程测距(DOWR, Dual One-way Ranging)模式被认为是空间引力波探测中时间延迟干涉(TDI, Time Delay Interferometry)技术的特殊形式(Francis et al., 2015),而 KBR 系统的有偏测距数据中姿态耦合噪声的矫正方法则与星间激光干涉中 TTL(Tilt-To-Length)噪声的扣除技术类似(Chwalla et al., 2020)。由此,对低低跟踪重力卫星 KBR 系统预处理的研究将为我国空间激光干涉引力波探测任务中核心测量系统的数据预处理积累宝贵的经验和数据。

本文系统性介绍基于双向单程模式的低低跟踪重力卫星核心 KBR 系统的测距原理与噪声抑制机制,详细阐述对 KBR 测距系统数据预处理的研究,并基于 GFO 实测数据,分析比对本文所研发的预处理算法的噪声抑制性能与处理精度,介绍 KBR 数据精度分析方法,探讨 KBR 数据在电离层测量以及实时监测中的可能应用。

## 1 双频双向单程测距原理

如前文所述,KBR 系统是低低跟踪重力卫星的核心科学载荷之一,高精度星间微波有偏测距数据则是重力卫星任务的关键数据产品。以 GRACE/GFO 为例,经由预处理后,KBR1B 数据产品包含高精度微波双频双向单程测距数据,以及飞行时间、相位中心矫正数据等(Wen et al., 2019)。KBR1B 数据作为科学数据处理的关键输入,结合 GNSS(Global Navigation Satellite System)精密定轨数据产品以及加速度计非保守力测量数据产品,可实现地球静态和时变重力场模型的构建,获得低低跟踪重力卫星任务最终科学数据产品(罗志才等, 2016)。本节以 GFO 为例,从 KBR 系统测量原理出发,基于噪声产生机制与传递模式,简介 KBR 数据预处理中对关键载波频率不稳定性噪声实现跨越多个量级抑制的高效方法,以及电离层影响、飞行时间、相位中心到质心等关键矫正的方法。

### 1.1 双向单程测距原理

如图 1 所示,GFO 卫星以超稳晶振(USO, Ultra Stable Oscillator)作为基准驱动产生 K/Ka 波段微波信号,即每颗卫星的本地参考振子信号。同时,每颗卫星通过微波天线向远端卫星发射并接收 K/Ka 波段信号,建立星间微波测量链路。每颗卫星将接收到的 K/Ka 微波信号转换为电子学信号后,与本地参考振子信号进行外差干涉,生成差分信号,并通过处

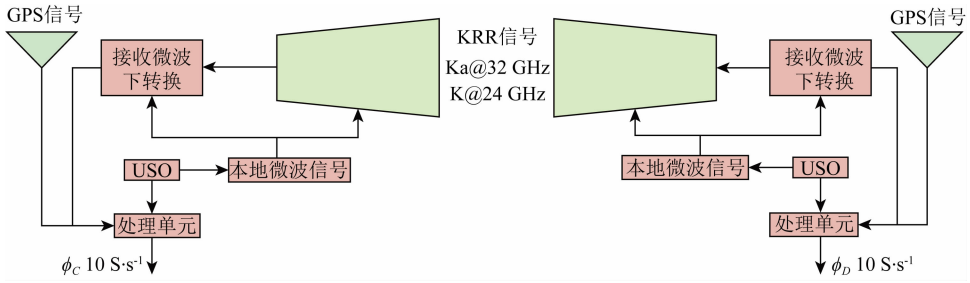


图1 GFO星载微波测距系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GFO spaceborne microwave ranging system

理单元提取并输出采样率为 10 Hz 的原始数据, 采样时钟信号由本地 USO 生成. 原始数据通过数传系统传输到地面数据中心供进一步处理 (Thomas, 1999; Frommknecht, 2007).

USO 本身存在频率不稳定性, 通过倍频过程造成 K/Ka 微波关键频率不稳定性噪声. 记  $t$  时刻微波相位

$$\phi_i(t) = \bar{\phi}_i(t) + \delta\phi_i(t), \quad (i = C, D) \quad (1)$$

其中  $\bar{\phi}_i(t)$  是标称相位,  $\delta\phi_i(t)$  是 K/Ka 载波频率不稳定性引起的相位噪声, 指标  $i = C, D$  标记 GFO 的  $C, D$  星. 同时, USO 不稳定性将会引起数据的采样时间的不均匀性. 在标称时间  $t$ , 记第  $i$  颗卫星的时钟标签为  $t_i = t + \Delta t_i$ ,  $\Delta t_i$  为时间标签相对标称时间的偏差. 在  $t$  时刻,  $i$  卫星接收到的来自  $j$  星的微波相位可记为:

$$\begin{aligned} \phi^j(t + \Delta t_i) &= \phi_j(t + \Delta t_i - \tau_i^j) + I_i^j + d_i^j + \zeta_i^j \\ &= \bar{\phi}_j(t + \Delta t_i - \tau_i^j) + \delta\phi_j(t + \Delta t_i - \tau_i^j) \\ &\quad + I_i^j + d_i^j + \zeta_i^j, \quad (i, j = C, D) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\phi_j(t + \Delta t_i - \tau_i^j)$  代表第  $j$  颗卫星在  $t + \Delta t_i - \tau_i^j$  时刻发出的微波相位,  $\tau_i^j$  表示微波由  $j$  卫星到  $i$  卫星飞行时间 (TOF, Time of Flight),  $I_i^j$  代表微波信号穿过电离层产生的相位偏差,  $d_i^j$  包含仪器、微波多路径反射以及中性大气造成的偏差,  $\zeta_i^j$  代表系统噪声, 包括电子学噪声等.

$i$  星本地参考相位与接收到的来自  $j$  星的微波相位, 通过拍频得到  $i$  星的差分相位为 (Kim, 2000)

$$\begin{aligned} \phi_i^j(t + \Delta t_i) &= \phi_i(t + \Delta t_i) - \phi^j(t + \Delta t_i) \\ &= \bar{\phi}_i(t + \Delta t_i) + \delta\phi_i(t + \Delta t_i) \\ &\quad - \bar{\phi}_j(t + \Delta t_i - \tau_i^j) - \delta\phi_j(t + \Delta t_i - \tau_i^j) \\ &\quad + I_i^j + d_i^j + \zeta_i^j + N_i^j, \quad (i, j = C, D) \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $N_i^j$  为整数周期模糊度. 载波不稳定性相位噪声  $\delta\phi_i(t)$  分为长时关联噪声和低频随机噪声两部

分. 由于每颗卫星的本地 USO 所产生的相位噪声都会传递到双星 KBR 差分相位中, 因此在精确校准时间标签之后, 组合在同一时刻的双星 KBR 差分相位可压制关联时间大于微波传播时间的相位误差. 由此, 组合双星 KBR 差分相位后所得的双向单程相位  $\Theta(t)$  为

$$\begin{aligned} \Theta(t) &\equiv \phi_C^D(t + \Delta t_C) + \phi_D^C(t + \Delta t_D) \\ &= \bar{\phi}_C(t + \Delta t_C) - \bar{\phi}_D(t + \Delta t_C - \tau_C^D) \\ &\quad + \bar{\phi}_D(t + \Delta t_D) - \bar{\phi}_C(t + \Delta t_D - \tau_D^C) \\ &\quad + \delta\phi_C(t + \Delta t_C) - \delta\phi_D(t + \Delta t_C - \tau_C^D) \\ &\quad + \delta\phi_D(t + \Delta t_D) - \delta\phi_C(t + \Delta t_D - \tau_D^C) \\ &\quad + (N_C^D + N_D^C) + (I_C^D + I_D^C) \\ &\quad + (d_C^D + d_D^C) + (\zeta_C^D + \zeta_D^C). \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 参考相位和相位噪声可作如下线性展开:

$$\bar{\phi}(t + \Delta t - \tau) \approx \bar{\phi}(t) + \bar{f}\Delta t - \bar{f}\tau, \quad (5)$$

$$\delta\bar{\phi}(t + \Delta t - \tau) \approx \delta\bar{\phi}(t) + \delta\bar{f}\Delta t - \delta\bar{f}\tau. \quad (6)$$

将式 (5) 与 (6) 代入式 (4), 可得 GFO 在标称时刻  $t$  的双向单程相位为:

$$\begin{aligned} \Theta(t) &= (f_C\tau_C^D + f_D\tau_D^C) + (\delta f_C\tau_C^D + \delta f_D\tau_D^C) \\ &\quad + (f_C - f_D)(\Delta t_C - \Delta t_D) + (\delta f_C - \delta f_D)(\Delta t_C - \Delta t_D) \\ &\quad + (N_C^D + N_D^C) + (I_C^D + I_D^C) + (d_C^D + d_D^C) + (\zeta_C^D + \zeta_D^C). \end{aligned} \quad (7)$$

其中, 第一项即为标称测量相位; 第二项表示载波频率不稳定性相位噪声; 第三项来自于时间标签误差引起的相位测量噪声, 经由 GNSS 时间校准后误差远小于第二项的贡献, 可忽略不计; 第四项为频率噪声与时间标签误差的耦合项, 可忽略不计. 同时, 对于 GRACE/GFO 而言,  $\tau_C^D$  与  $\tau_D^C$  的差别仅约为 0.05  $\mu\text{s}$ , 远小于微波飞行时间  $\tau \approx 1 \text{ ms}$ , 因此令  $\tau = \tau_C^D = \tau_D^C$ , 则式 (7) 第一项可近似为

$$f_C\tau_C^D + f_D\tau_D^C \approx (f_C + f_D)\tau - \Delta\Theta_{\text{TOF}}(t), \quad (8)$$

其中  $\Delta\Theta_{\text{TOF}}(t)$  为飞行时间修正. 将式 (7) 转化为双向单程微波有偏星间距:



$$\begin{aligned}
R(t) &= \frac{\Theta(t)}{f_C + f_D} \\
&= \rho(t) - \Delta\rho_{\text{TOF}}(t) + c \frac{\delta f_C \tau_C^D + \delta f_D \tau_D^C}{f_C + f_D} \\
&\quad + c \frac{N_C^D + N_D^C}{f_C + f_D} + c \frac{I_C^D + I_D^C}{f_C + f_D} + c \frac{d_C^D + d_D^C}{f_C + f_D} \\
&\quad + c \frac{\epsilon_C^D + \epsilon_D^C}{f_C + f_D}. \quad (9)
\end{aligned}$$

其中, 第一项表示  $t$  时刻的瞬时星间距, 第二项表示飞行时间修正, 第三项表示残余高频载波频率噪声引起的星间距噪声, 其周期小于飞行时间  $\tau$ . 记  $K/K_a$  频段双向单程微波有偏星间距为  $R_K/R_{K_a}$ .

### 1.2 飞行时间修正

如图 2 所示,  $e_{CD}$  表示双星  $t$  时刻的星间微波链路基线的单位矢量,  $\rho_C^D$  表示  $t - \tau_C^D$  时刻  $D$  卫星发射的微波信号在  $t$  时刻到达  $C$  卫星的飞行距离, 位移矢量  $\Delta_D$  表示  $D$  卫星经过微波飞行时间  $\tau_C^D$  的位移;  $\rho_D^C$  表示  $t - \tau_D^C$  时刻  $C$  卫星发射的微波信号在  $t$  时刻到达  $D$  卫星的飞行距离, 位移矢量  $\Delta_C$  表示  $C$  卫星经过微波飞行时间  $\tau_D^C$  的位移. 由于微波在双星间传播过程中,  $C/D$  星沿各自飞行方向运动, 微波飞行距离  $\rho_C^D/\rho_D^C$  与两颗卫星间的星间距真值  $\bar{\rho}$  存在偏差. 由图 2 几何关系可知  $\rho_C^D = |\bar{\rho}e_{CD} + \Delta_D|$  以及  $\rho_D^C = |\bar{\rho}e_{CD} - \Delta_C|$ , 因此, 微波飞行距离与星间距真值满足  $\rho_D^C < \bar{\rho} < \rho_C^D$ . 将微波飞行距离与星间距真值的偏差称为微波星间测距数据的飞行时间修正.

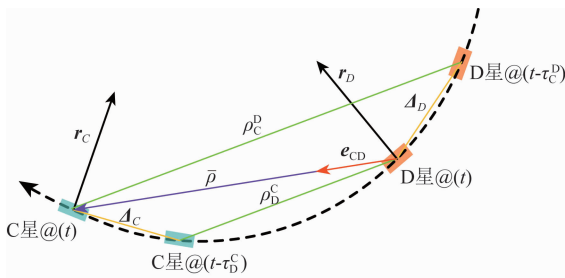


图 2 GFO 双星星间距  $\bar{\rho}$  与  $\rho_D^C, \rho_C^D$  的关系

Fig. 2 The relationship between the instantaneous range  $\bar{\rho}$  and one-way range  $\rho_D^C, \rho_C^D$

卫星位移矢量  $\Delta_i$  可近似表示为  $\Delta_i = \dot{r}_i \cdot \tau_i^j$ , 其中  $\dot{r}_i$  表示  $i$  卫星速度. 微波飞行时间内卫星运动距离  $|\Delta_i| \approx 10 \text{ m}$ ,  $|\Delta_i| \ll \bar{\rho}$  远小于双星星间距, 因此, 飞行时间修正  $\Delta\rho_{\text{TOF}}$  可表示为

$$\Delta\rho_{\text{TOF}} = \frac{f_C \cdot \tau_C^D \cdot (e_{CD} \cdot \dot{r}_C) - f_D \cdot \tau_D^C \cdot (e_{CD} \cdot \dot{r}_D)}{f_C + f_D}. \quad (10)$$

基于 Yan 等(2021)对 GFO 微波与激光信号飞

行时间修正的详细分析与讨论, 微波飞行时间修正中相对论效应对 KBR 测距数据的影响远小于 KBR 系统设计指标, 因此本文计算飞行时间修正时仅考虑经典物理效应. 相对论效应对微波飞行时间修正量级的详细评估请见文献 Yan 等(2021).

### 1.3 电离层影响修正

微波信号在传播过程中会受电离层中自由电子影响产生相位延迟. 在自由电子含量 (TEC, Total Electron Content) 较少时, 该相位延迟  $I_i^j$  可表示为 (Thomas, 1999)

$$I_i^j = \frac{\text{TEC}_i^j}{f_j}. \quad (11)$$

其中,  $\text{TEC}_i^j$  表示  $j$  卫星激发,  $i$  卫星接收的微波链路的积分电子含量. 忽略 GFO 在轨运行时空间环境差异, 可假设  $\text{TEC}_C^D = \text{TEC}_D^C$ . 由电离层引起的双向单程星间距修正可表示为:

$$\Delta\rho_1(t) = c \frac{\text{TEC}_C^D + \text{TEC}_D^C}{f_C + f_D} = c \frac{\text{TEC}}{f_C f_D}. \quad (12)$$

通过对  $R_K/R_{K_a}$  进行以下组合得到去除电离层修正的星间距  $R_{\text{ionofree}}$ :

$$\begin{aligned}
R_{\text{ionofree}} &= \frac{f_C^K f_D^K R_K - f_C^{K_a} f_D^{K_a} R_{K_a}}{f_C^K f_D^K - f_C^{K_a} f_D^{K_a}} \\
&= \text{ion}_{K_a} \times R_{K_a} - \text{ion}_K \times R_K. \quad (13)
\end{aligned}$$

其中,  $\text{ion}_{K_a} = 16/7, \text{ion}_K = 9/7$ .

### 1.4 相位中心修正

KBR 测距系统实际测量双星 KBR 天线相位中心之间的距离及变化, 卫星姿态相对于星间连线方向 (LOS, Line-of-sight) 的抖动会引起星间指向抖动, 进而引起相位中心之间距离的变化, 对微波测距信号产生干扰. 由此, 需将相位中心间的有偏距离转换为双星质心间的有偏距离. 依据质心与相位中心的几何关系, 如图 3 所示, 相位中心修正 (AOC, Antenna Offset Correction) 为

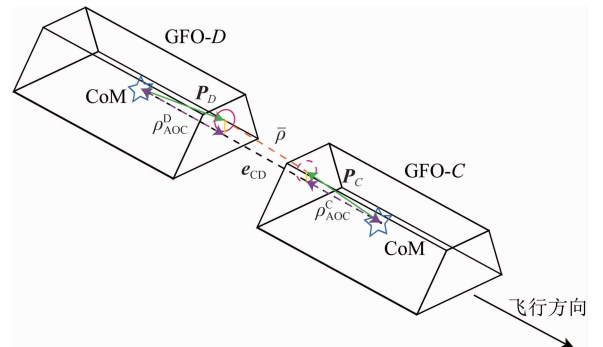


图 3 GFO 相位中心修正示意图

Fig. 3 The schematic diagram of phase centre correction of GFO

$$\begin{aligned} \Delta\rho_{AOC} &= \rho_{AOC}^C + \rho_{AOC}^D \\ &= -|\mathbf{P}_C| \cdot \mathbf{e}_{CD} \cdot \mathbf{P}_C + |\mathbf{P}_D| \cdot \mathbf{e}_{CD} \cdot \mathbf{P}_D, \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{P}_i$  为第  $i$  颗卫星相位中心矢量. 图 3 中红色圆圈表示 KBR 微波相位中心, 蓝色五角星表示卫星质量中心.

## 2 KBR 数据预处理与结果比对

### 2.1 预处理流程

本节以 GFO 任务为例. 美国 JPL 与德国 GFZ 等单位对 GFO 数据产品进行分级管理. L1A 级数据通过对 L0 级数据进行单位转换、质量检查以及追加相应标签后得到, 两者之间可以相互转换. 噪声抑制与偏差矫正等关键预处理在 L1A 至 L1B 级数据预处理过程中完成, 所需输入数据由表 1 给出.

表 1 GFO 微波数据 L1A 至 L1B 处理所需文件

Table 1 Required file products for processing microwave data from L1A to L1B of GFO

输入产品名称	输入产品内容
KBR1A	L1A 级 KBR 相位数据
CLK1B	L1B 级原子时间标签与 GNSS 时间标签差值
USO1B	L1B 级 K/Ka 波段微波频率
PLT1A	L1A 级微波飞行时间
GNI1B	L1B 级惯性系精密定轨数据
SCA1B	L1B 级星敏感器姿态数据
VKB1B	L1B 级 KBR 天线相位中心矢量(科学参考系)

注: 以上数据均由 NASA 支持的 PODAAC 网盘提供, 下载地址为 <https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/GeodeticsGravity/gracefo>.

GFO 微波数据预处理主要包含以下步骤(图 4):

(1) 相位拼接与异常处理. 由于相位计测量计数范围限制, 实测微波相位积累到一定数值后会出现数据折叠(GFO 为  $10^8$  cycle), 需首先拼接 KBR1A 微波相位. 之后, 针对微波相位中的阶跃、间断等数据异常, 进行分类判断, 进行插值或建模重构. 其中, 当相位间断时间超过 21 s 时, 则判定为数据间断而不做处理.

(2) 时间标签矫正. 为实现频率不稳定性噪声的高效抑制, 消除采样不均匀性带来的误差, 需依据时钟矫正数据产品 CLK1B 将 KBR1A 数据时间标签矫正到 GNSS 时间, 并将 KBR1A 微波相位插值到矫正后的时间采样点.

(3) 双频双向单程测距数据. 首先, 根据上述双向单程测距机制, 组合双星单频相位抑制载波频率不稳定性噪声, 通过式(9)得到 K/Ka 频段的 DOWR 测距数据  $R_K/R_{Ka}$ . 其次, 结合 USO1B 提供的双星 K/Ka 频段微波频率, 通过式(13)组合 K/Ka 双频 DOWR 测距数据得到去除电离层影响的微波测距数据  $R_{ionofree}$ .

(4) 飞行时间矫正. 结合 GNI1B 惯性系精密定轨数据与 PLT1A 星间微波飞行时间, 通过式(10)计算飞行时间矫正.

(5) 相位中心矫正. 结合 VKB1B 提供的 KBR 天线相位中心矢量、SCA 双星姿态数据与 GNI1B 精密定轨数据, 通过式(14)计算相位中心矫正, 得到双星质心间测距数据产品.

(6) 抗混叠滤波与重采样. 基于 KBR 系统测距精度, 微波测距数据中重力场信号在 0.02 Hz 以上

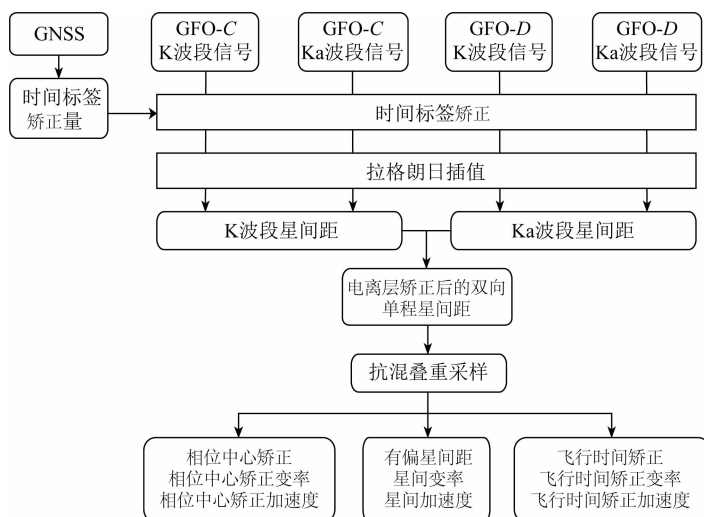


图 4 GFO 微波数据处理流程

Fig. 4 The flow for processing microwave data of GFO

低于测量本底噪声. 因此, 为减少运算量, 对 L1B 级数据产品进行降采样处理. 为防止混叠现象, 在降采样前应用了 CRN 抗混叠滤波器 (Thomas, 1999; Wen et al., 2019). CRN ( $N$ -th order self-Convolution of Rectangular) 滤波器将时间域的矩形窗函数的  $N$  次自卷积设计为低通滤波器, 该矩形窗函数的单边带宽为  $N_B/T_f$  且振幅为 1. 参考 GRACE 卫星数据处理手册 (Wu et al., 2006), 表 2 为 CRN 滤波器参数列表.

表 2 CRN 滤波器参数  
Table 2 Coefficients of CRN filter

滤波器参数	参数数值
原始数据采样频率 $f_s$	10 Hz
自卷积次数 $N_c$	7
滤波器抽头长度 $N_f$	707
通带中频率点数 $N_B$	7
低通滤波器截止频率 $B$	0.1 Hz
滤波器时间长度 $T_f$	70.7 s
J2 项频率	0.37 mHz

时间域矩形窗函数的离散傅里叶变换 (DFT, Discrete Fourier Transform) 对应着频率域的  $\sin x/\sin y$  形式函数, 因此 CRN 滤波器的频率响应为

$$H_k = \sum_{k'=-N_B}^{N_B} \left( \frac{\sin[\pi(k-k')/N_c]}{\sin[\pi(k-k')/N_f]} \right)^{N_c}. \quad (15)$$

将式 (15) 进行离散反傅里叶变换, 得到 CRN 低通滤波器抽头系数. 由于  $H_k$  是偶函数, 则

$$F_n = \frac{1}{F^{\text{Norm}}} \sum_{k=-N_h}^{N_h} H_k \cos(2\pi kn/N_f), \quad |n| \leq N_h, \quad (16)$$

其中,

$$F^{\text{Norm}} = \sum_{i=-N_h}^{N_h} \cos\left(\frac{2\pi f_0 i}{f_s}\right) \sum_{k=-N_h}^{N_h} H_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{N_f}\right). \quad (17)$$

又根据 DFT 导数性质, 可得 CRN 一阶微分器与二阶微分器为:

$$\dot{F}_n = \frac{1}{F^{\text{Norm}}} \sum_{k=-N_h}^{N_h} -2\pi f_k H_k \sin(2\pi kn/N_f), \quad |n| \leq N_h. \quad (18)$$

$$\ddot{F}_n = \frac{1}{F^{\text{Norm}}} \sum_{k=-N_h}^{N_h} -(2\pi f_k)^2 H_k \cos(2\pi kn/N_f), \quad |n| \leq N_h. \quad (19)$$

FIR (Finite Impulse Response) 滤波表示为以下卷积形式:

$$\rho'_i = \sum_{n=-N_h}^{N_h} F_n \rho_{i-n}, \quad (20)$$

$$\dot{\rho}'_i = \sum_{n=-N_h}^{N_h} \dot{F}_n \rho_{i-n}, \quad (21)$$

$$\ddot{\rho}'_i = \sum_{n=-N_h}^{N_h} \ddot{F}_n \rho_{i-n}, \quad (22)$$

其中,  $N_h = (N_f - 1)/2$ ,  $i$  表示滤波器抽头与原始星间距卷积后的输出索引,  $i = 0 \sim N_f + N_p$ ,  $N_p$  为原始信号长度,  $\rho', \dot{\rho}', \ddot{\rho}'$  表示滤波后的星间距、星间变率与星间加速度. 同时, 由于原始飞行时间矫正与相位中心矫正的采样率为 1 Hz, 在计算该两项矫正的过程中, 应将 CRN 滤波器中  $f_s$  设置为 1 Hz, 并由式 (15) 至 (19), 生成滤波器与微分器系数为  $F_n^C, \dot{F}_n^C$  与  $\ddot{F}_n^C$ . 有偏星间距、星间变率与星间加速度的飞行时间矫正与相位中心矫正可表示为:

$$\Delta \rho'_{\text{TOF}}[i] = \sum_{n=-N_h}^{N_h} F_n^C \Delta \rho_{\text{TOF}}[i-n], \quad (23)$$

$$\Delta \rho'_{\text{AOC}}[i] = \sum_{n=-N_h}^{N_h} F_n^C \Delta \rho_{\text{AOC}}[i-n],$$

$$\Delta \dot{\rho}'_{\text{TOF}}[i] = \sum_{n=-N_h}^{N_h} \dot{F}_n^C \Delta \rho_{\text{TOF}}[i-n], \quad (24)$$

$$\Delta \dot{\rho}'_{\text{AOC}}[i] = \sum_{n=-N_h}^{N_h} \dot{F}_n^C \Delta \rho_{\text{AOC}}[i-n],$$

$$\Delta \ddot{\rho}'_{\text{TOF}}[i] = \sum_{n=-N_h}^{N_h} \ddot{F}_n^C \Delta \rho_{\text{TOF}}[i-n], \quad (25)$$

$$\Delta \ddot{\rho}'_{\text{AOC}}[i] = \sum_{n=-N_h}^{N_h} \ddot{F}_n^C \Delta \rho_{\text{AOC}}[i-n],$$

其中,  $\Delta \rho'_{\text{TOF}}, \Delta \dot{\rho}'_{\text{TOF}}, \Delta \ddot{\rho}'_{\text{TOF}}$  表示滤波后的有偏星间距、星间变率与星间加速度的飞行时间矫正,  $\Delta \rho'_{\text{AOC}}, \Delta \dot{\rho}'_{\text{AOC}}, \Delta \ddot{\rho}'_{\text{AOC}}$  表示滤波后的有偏星间距、星间变率与星间加速度的相位中心矫正.

## 2.2 预处理结果比对

依据前文所讨论的预处理算法及具体流程, 本文研制并编写了低低跟踪重力卫星 KBR 系统数据预处理与分析的程序模块, 可实现 KBR 系统高精度 L1B 级数据产品的生产以及初步的数据精度和质量评估功能. 通过与 JPL 发布的 KBR 系统预处理产品 (KBR1B) 的完整比对, 给出实际处理精度的评估验证. 本文处理结果与 JPL 官方数据产品结果高度吻合, 两者残差远小于 KBR 系统的设计精度指标. 该处理结果的精度满足目前微波测距低低跟踪重力卫星任务科学数据处理即重力场反演的需求.

下文以 GFO 卫星 2019 年 1 月 1 日实测数据为例, 给出 JPL 发布的 KBR1B 数据产品与本文处理结果的详细比对. 图 5, 图 6 与图 7 分别表示有偏星间距、星间变率与星间加速度数据的对比结果, 其中

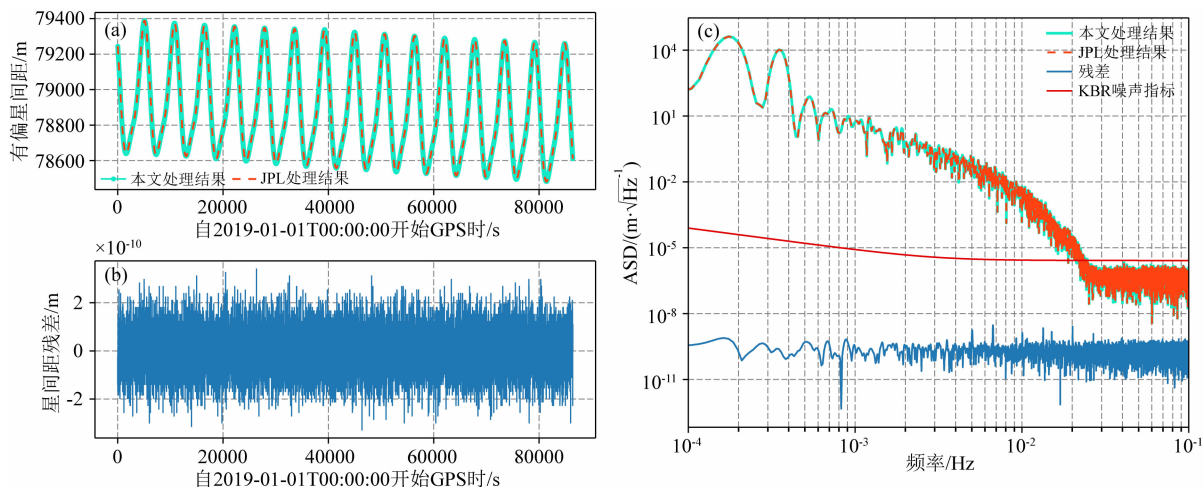


图 5 JPL 有偏星间距与本文处理结果(a), 两者残差(b), 星间距与残差振幅谱密度(c)

Fig. 5 Biased range released by JPL and the results processed by this paper (a), their residual (b), amplitude spectral density (ASD) of the biased range and the residual (c)

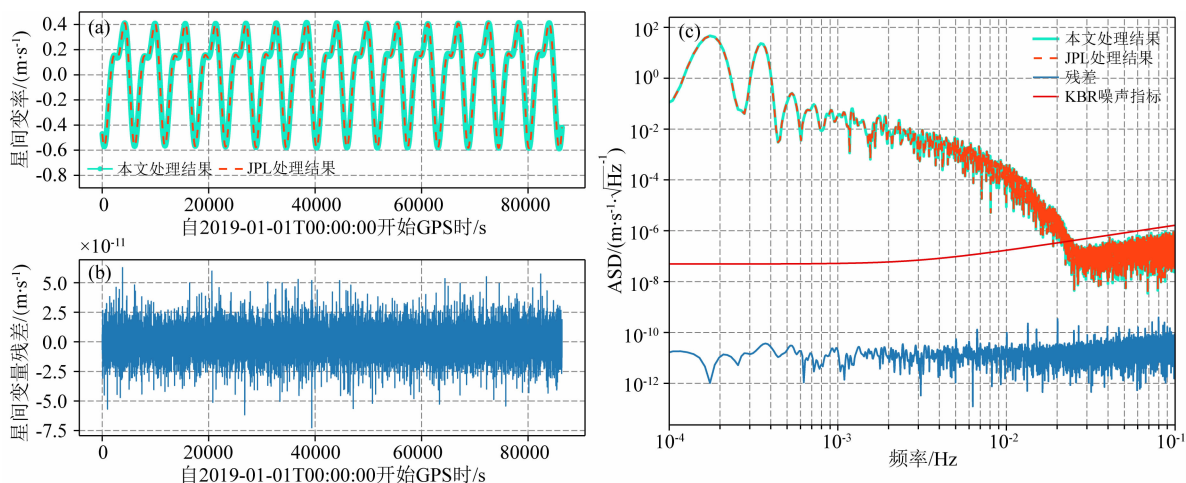


图 6 JPL 星间变率与本文处理结果(a), 两者残差(b), 星间变率与残差振幅谱密度(c)

Fig. 6 Range-rate released by JPL and the results processed by this paper (a), their residual (b), amplitude spectral density of the range-rate and the residual (c)

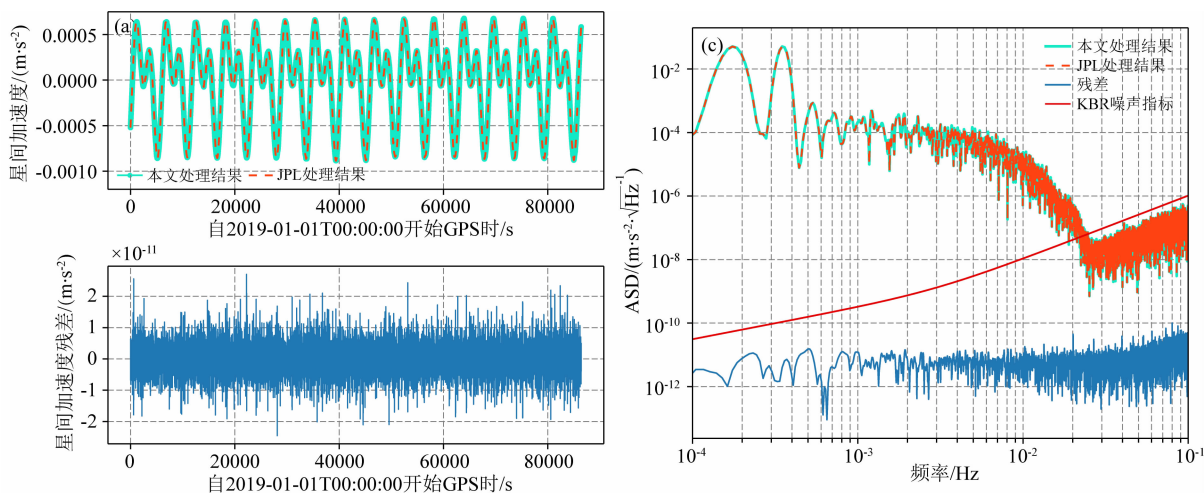


图 7 JPL 星间加速度与本文处理结果(a), 两者残差(b), 星间加速度与残差振幅谱密度(c)

Fig. 7 Range-acceleration released by JPL and the results processed by this paper (a), their residual (b), amplitude spectral density of the range-acceleration and the residual (c)

绿色实线代表本文的处理结果,与 JPL 公布数据(橙色虚线)高度吻合,而图 5b,图 6b 与图 7b 中蓝色实线代表本文处理结果与 JPL 发布数据的残差.图 5c,图 6c 与图 7c 中红色实线代表 KBR 系统的本底噪声指标(Kornfeld et al., 2019),在重力场有效信号频段内,星间距残差不超过  $1 \times 10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,星间变率残差不超过  $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,星间加速度

残差不超过  $1 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$ ,远低于 KBR 观测本底噪声水平,可满足重力场反演精度要求.

图 8 至图 13 分别表示本文计算的星间距、星间变率与星间加速度的飞行时间矫正与相位中心矫正同 JPL 官方数据的对比结果.本文计算的矫正结果残差远低于 KBR 观测本底噪声水平,可满足重力场反演精度要求.

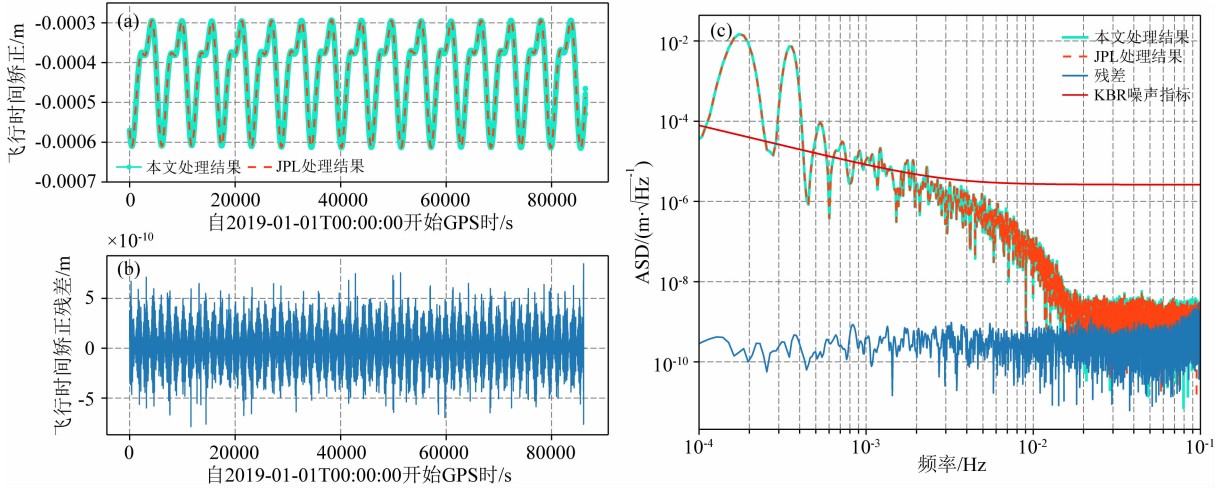


图 8 JPL 星间距飞行时间矫正与本文处理结果(a),两者残差(b),星间距飞行时间矫正与残差振幅谱密度(c)

Fig. 8 TOF correction for biased range released by JPL and the results processed by this paper (a), their residual (b), amplitude spectral density of the TOF correction for biased range and the residual (c)

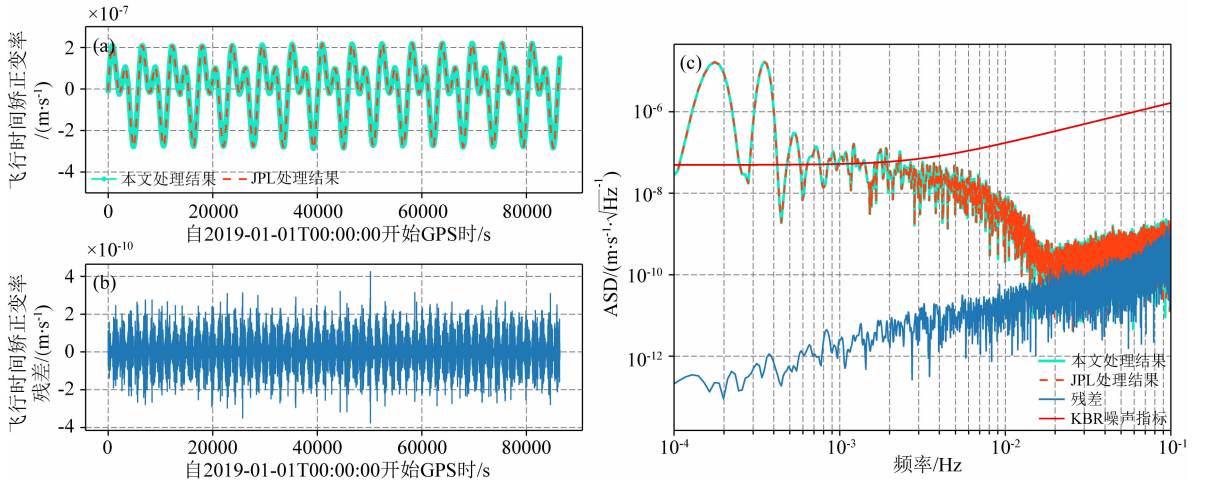


图 9 JPL 星间变率飞行时间矫正与本文处理结果(a),两者残差(b),星间变率飞行时间矫正与残差振幅谱密度(c)

Fig. 9 TOF correction for range-rate released by JPL and the results processed by this paper (a), their residual (b), amplitude spectral density of the TOF correction for range-rate and the residual (c)

### 3 微波测距数据分析

#### 3.1 电离层矫正分析与自由电子分布测定

如 1.4 节所述,双频微波测距技术利用 K/Ka 信号在电离层中传播的差异,解算并消除电离层自由电

子含量非均匀性导致的干扰信号,得到消除电离层干扰的星间测距数据  $R_{\text{ionofree}}(t)$ . 同时,  $R_{\text{ionofree}}(t)$  数据可作为基准分析电离层自由电子含量分布对 K 或 Ka 波段双程测距的影响,从而反演得到电离层自由电子分布的相关信息.

$$\Delta\phi_1 = R_{\text{ionofree}} - R_{\text{Ka}}. \quad (26)$$



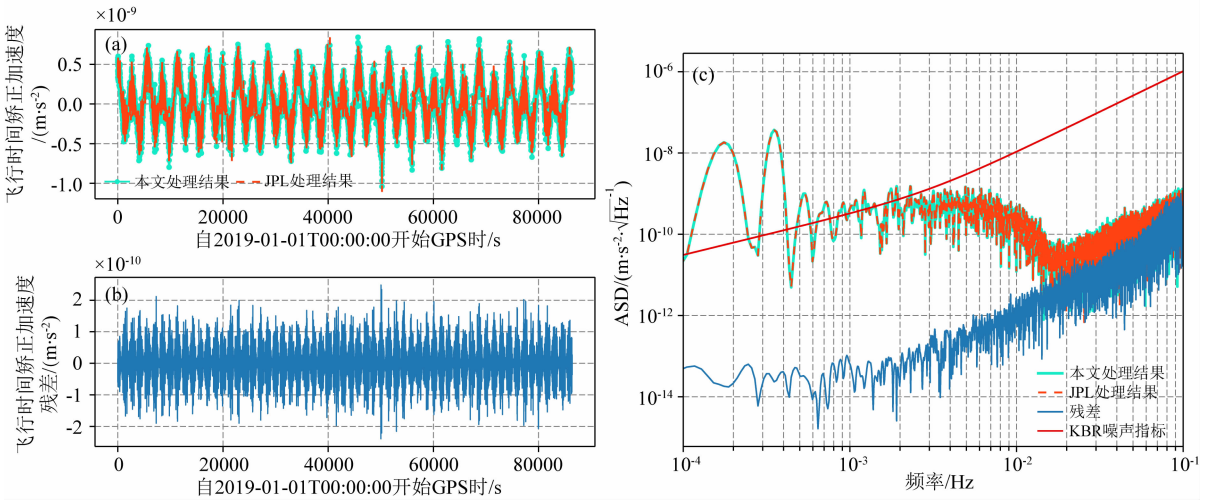


图 10 JPL 星间加速度飞行时间矫正与本文处理结果(a), 两者残差(b), 星间加速度飞行时间矫正与残差振幅谱密度(c)  
Fig. 10 TOF correction for range-acceleration released by JPL and the results processed by this paper (a), their residual (b), amplitude spectral density of the TOF correction for range-acceleration and the residual (c)

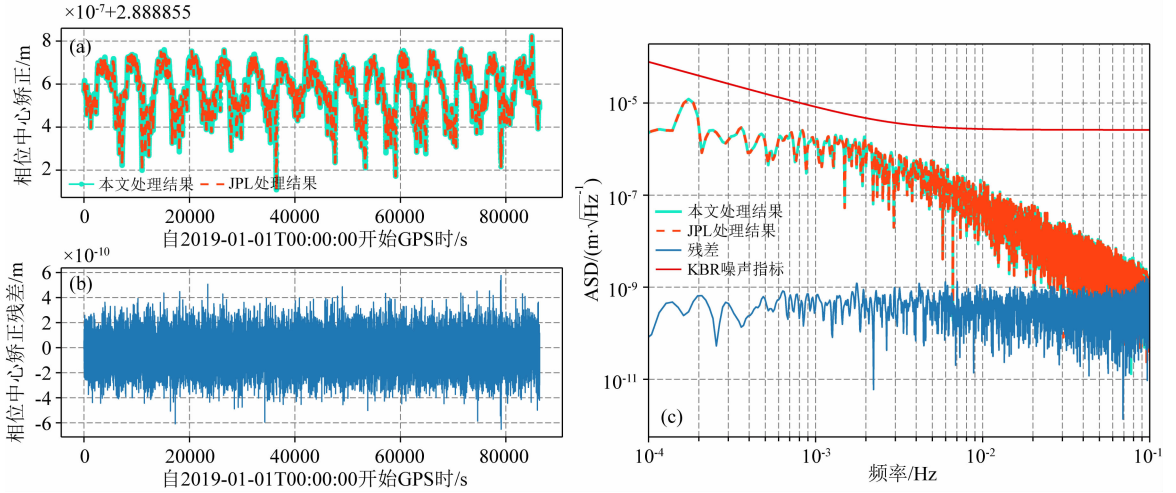


图 11 JPL 星间距相位中心矫正与本文处理结果(a), 两者残差(b), 星间距相位中心矫正与残差振幅谱密度(c)  
Fig. 11 AOC for biased range released by JPL and the results processed by this paper (a), their residual (b), amplitude spectral density of the AOC for biased range and the residual (c)

其中,  $\Delta\rho_1$  定义为 Ka 波段的电离层矫正. 由于电离层对微波相位的延迟效应, 微波在电离层中传播的相速度折射系数  $n_{\text{ph}}^1$  可以近似表示为(Brunner and Gu, 1991):

$$n_{\text{ph}}^1 = 1 - \frac{C_2 N_e}{f^2}, \quad (27)$$

其中,  $f$  表示微波频率,  $N_e$  表示电离层电子密度,  $C_2 = \frac{e^2}{8\pi^2 \epsilon_0 m_e} \approx 40.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $e$  表示电子电荷,  $\epsilon_0$  表示真空介电常数,  $m_e$  表示电子质量. 根据费马原理, 电离层对 Ka 波段微波测距数据的延迟效应可表示为

$$\Delta\rho_1 = -\frac{40.3}{f_{\text{Ka}}^2} \int N_e ds_0 = -\frac{40.3}{f_{\text{Ka}}^2} \text{TEC}, \quad (28)$$

其中,  $s_0$  表示微波传播路径. 然而,  $\Delta\rho_1$  中仍存在整周期不确定性带来的偏差, 因此, 传统分析方法中常用  $\Delta\rho_1$  在相邻时刻的差分, 来定义无偏的时间差分星间自由电子含量  $D(\text{TEC})$  (熊超等, 2014; Wen et al., 2019),

$$D(\text{TEC}) = -\frac{D(\Delta\rho_1) \times f_{\text{Ka}}^2}{40.3}, \quad (29)$$

其中,  $D$  表示时间差分算子. 即

$$\text{TEC}(t + \Delta t) = \text{TEC}(t) + D(\text{TEC}(t)). \quad (30)$$

通过式(30), 利用积分方法可计算任意时刻  $t$  的星间自由电子含量, 实现电离层平均电子数密度的测量. 实际上, 对于微波测距、雷达测高与 GNSS 等测绘技术而言, 电离层引起的测量干扰主要来自

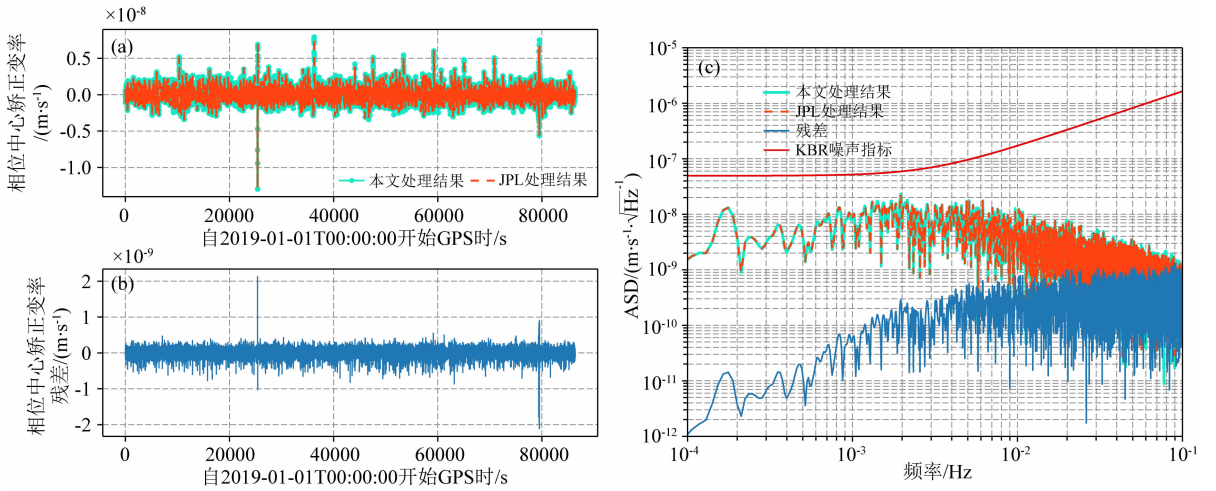


图 12 JPL 星间变率相位中心矫正与本文处理结果(a),两者残差(b),星间变率相位中心矫正与残差振幅谱密度(c)  
Fig. 12 AOC for range-rate released by JPL and the results processed by this paper (a), their residual (b), amplitude spectral density of the AOC for range-rate and the residual (c)

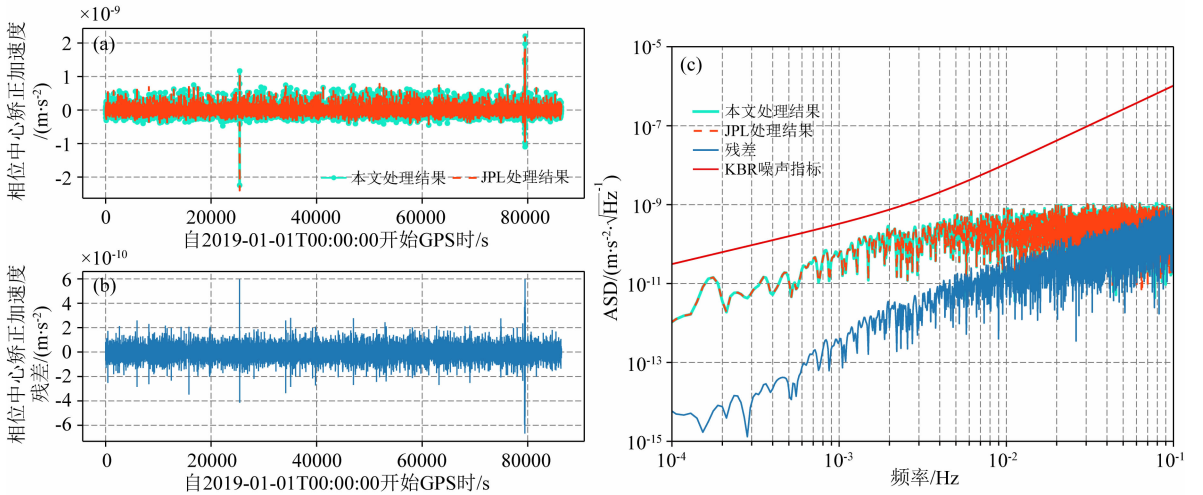


图 13 JPL 星间加速度相位中心矫正与本文处理结果(a),两者残差(b),星间加速度相位中心矫正与残差振幅谱密度(c)  
Fig. 13 AOC for range-acceleration released by JPL and the results processed by this paper (a), their residual (b), amplitude spectral density of the AOC for range-acceleration and the residual (c)

于自由电子含量在地球外部空间的非均匀性,自由电子空间分布的变化也反映了影响电离层变化的物理机制。因此,本文引入频域方法,利用低低跟踪重力卫星任务微波测距数据分析电离层水平自由电子含量在不同空间尺度下的变化信息。即,在积分自由电子数含量研究基础上,本文引入窄频带  $f_1 - f_2$  内电离层矫正信号所对应的星间自由电子含量变化幅度

$$TEC_{f_1-f_2} = - \frac{(\Delta\rho_1)_{f_1-f_2} \times f_{Ka}^2}{40.3}, \quad (31)$$

其中,  $TEC_{f_1-f_2}$  表示无整周期不确定性,反映了空间尺度约为  $2v/(f_1 + f_2)$  的自由电子含量变化的幅度,  $v$  为卫星飞行速度。  $TEC_{f_1-f_2}$  刻画了对应空间尺

度的自由电子含量变化的全球分布特征,从而反映不同空间尺度电离层非均匀性变化与日照、地磁场等物理因素的关系。这一方法从新的角度为电离层的深入研究提供了数据支撑。

下文以 GFO 在 0.04~0.08 Hz 范围内的特征性电离层矫正信号 ( $\Delta\rho_1$ )<sub>0.04~0.08</sub> 为例,分析约百公里尺度的电离层水平自由电子非均匀性变化  $TEC_{0.04~0.08}$  的全球分布特征。图 14 展示了 GFO 电离层矫正信号  $\Delta\rho_1$  的振幅谱密度,可以看出,图 14 中阴影部分 0.04~0.08 Hz 频段内包含了特征性的电离层信号。

利用带通滤波器有效截取 0.04~0.08 Hz 信号 ( $\Delta\rho_1$ )<sub>0.04~0.08</sub>, 计算水平自由电子含量涨落  $TEC_{0.04~0.08}$ , 见图 15,其中阴影条带代表 GFO 双星位于地影区



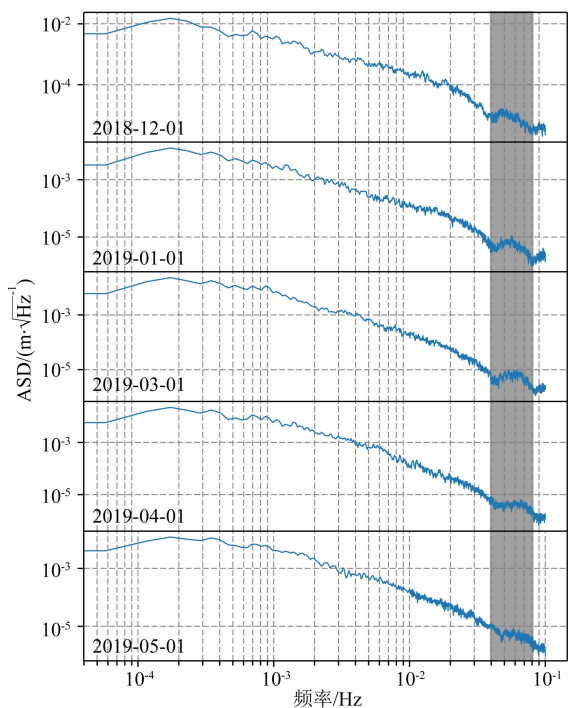


图 14 GFO 电离层矫正的振幅谱密度

Fig. 14 Amplitude spectral density for ionosphere correction of GFO

内,  $TEC_{0.04\sim 0.08}$  与太阳光照和地影交界区域强关联, 其局部放大见图 16. 图 15a 与图 15b 分别对应 2018 年冬至与 2019 年夏至, 因此图 15a 阴影条带左侧对应南极极昼区, 而图 15b 阴影条带右侧则对应北极极昼区. 在极区, 太阳光照日变化较小, 极昼区  $TEC_{0.04\sim 0.08}$  日变化较为平缓.

$TEC_{0.04\sim 0.08}$  的全球分布展示出百公里空间尺度的自由电子含量非均匀性变化分布集中在极区和赤道地区, 并与季节存在高度相关性. 图 17a 与图 17b 分别展示 2018 年 12 月 16 日至 22 日(冬至附近)与

2019 年 6 月 22 日至 30 日(夏至附近)中大于两倍标准差 ( $> 2\sigma$ ) 的  $TEC_{0.04\sim 0.08}$  的全球分布, 其中图 17a 对应冬至附近, 南极位于极昼区, 北极位于极夜区(图 15a 中阴影条带), 南极接受太阳光照时间最长而北极不接受太阳光照直射, 南极电离层 F 层电子活动剧烈, 该区域 TEC 变化幅度较大; 图 17b 对应夏至附近, 南极位于极夜区(图 15b 中阴影条带), 北极位于极昼区, 北极接受太阳光照时间最长而南极不接受太阳光照直射, 北极电离层 F 层电子活动剧烈, 该区域 TEC 变化幅度较大, 进一步展示出太阳光照对极区 TEC 变化的季节性影响. 由于太阳光照对极区的显著影响, 图 17a 与图 17b 中极区附近  $TEC_{0.04\sim 0.08}$  较中纬度地区变化明显, 这与目前关于 TEC 的观测结论相符(熊年禄等, 1999). 本文的频域方法利用低低跟踪重力卫星的微波测距数据给出了 TEC 全球分布尤其是极区分布的季节变化特征.

### 3.2 KBR 的系统误差

如第 1 节所述, KBR 系统的噪声来源复杂, 其中关键噪声均按照本文的预处理算法得以消除. 然而, 依据式(4)和(9), 双频双向单程测距数据中仍残余整数周期模糊度与电子学噪声等系统噪声. 整数周期模糊度对重力场反演精度基本无实质性影响, 因此, KBR 数据的分析仍需评估系统噪声的水平.

同一时刻的 K 和 Ka 频段微波相位中包含相同的地球重力场变化信息, 其相位与微波载波频率成正比. 通过以 K/Ka 载波频率为比例系数, 线性组合单频微波测距数据, 有效消除微波相位中重力场信号以及载波频率不稳定性噪声、电离层的中高频干扰等主要噪声, 实现系统噪声的提取与评估. 定义星间距的双差分信号如下(Kim and Lee, 2009):

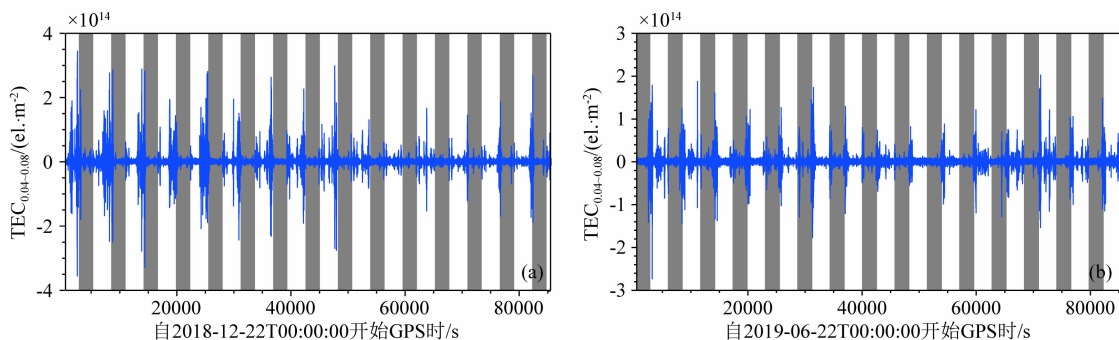


图 15 GFO 水平自由电子含量涨落(0.04~0.08 Hz)

(a) 2018 年 12 月 22 日; (b) 2019 年 6 月 22 日.

Fig. 15 Variations of GFO horizontal TEC (0.04~0.08 Hz)

(a) December 22th, 2018; (b) June 22th, 2019.

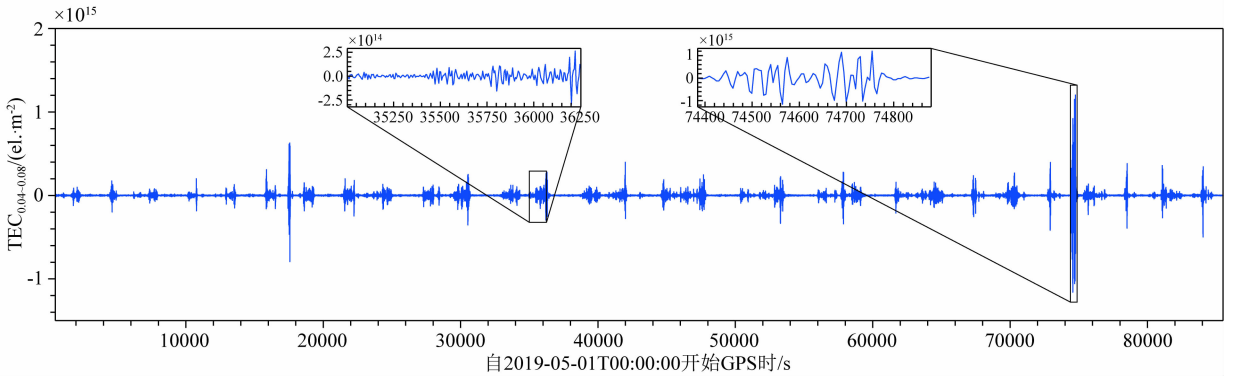


图 16 2019 年 5 月 1 日 GFO 水平自由电子含量涨落(0.04~0.08 Hz)

Fig. 16 Variations of GFO horizontal TEC on May 1st, 2019 (0.04~0.08 Hz)

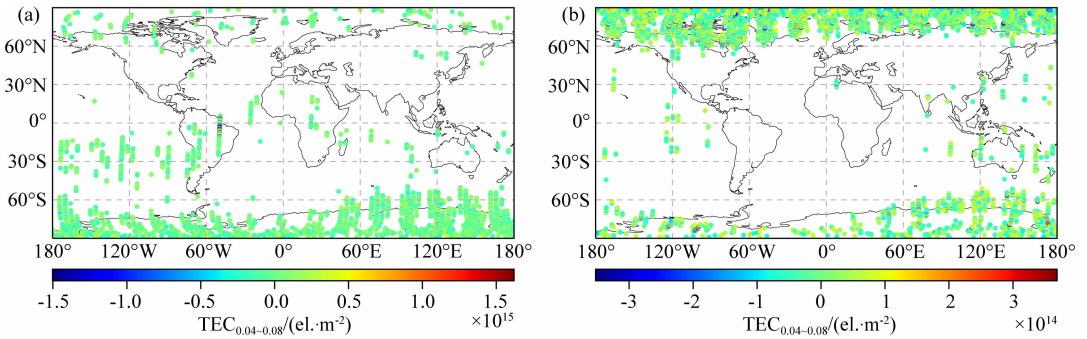


图 17 0.04~0.08 Hz 水平电子数涨落(&gt;2\sigma)的全球分布

(a) 2018 年 12 月 12—16 日; (b) 2019 年 6 月 22—30 日。

Fig. 17 Global distribution of variations of horizontal TEC between 0.04 and 0.08 Hz (&gt;2\sigma)

(a) December 12—16th, 2018; (b) June 22—30th, 2019.

$$\rho(t)_{DD} = \frac{4c}{f_C^K + f_D^K} \begin{bmatrix} \left( \phi_C^D(t + \Delta t_C)_K - \frac{f_C^K}{f_{K_a}^K} \phi_C^D(t + \Delta t_C)_{K_a} \right) \\ - \left( \phi_D^C(t + \Delta t_D)_K - \frac{f_D^K}{f_{K_a}^K} \phi_D^C(t + \Delta t_D)_{K_a} \right) \end{bmatrix}, \quad (32)$$

考虑到

$$\frac{f_D^K}{f_D^{K_a}} - \frac{f_C^K}{f_C^{K_a}} = \frac{24 \text{ GHz} + 0.5 \text{ MHz}}{32 \text{ GHz} + 0.5 \text{ MHz}} - \frac{24 \text{ GHz}}{32 \text{ GHz}} \approx 3.9062 \times 10^{-6}, \quad (33)$$

近似认为  $f_D^K/f_D^{K_a} = f_C^K/f_C^{K_a} = 0.75$ 。由于微波载波频率为 USO 频率的倍频, 所以 GFO 双星 K/Ka 波段载波频率噪声也近似满足  $\delta f_D^K/\delta f_D^{K_a} = \delta f_C^K/\delta f_C^{K_a} = 0.75$ 。式(32)则可表示为以下形式:

$$\rho_{DD} = \frac{4c}{f_C^K + f_D^K} \left[ \text{TEC} \left( \frac{1}{f_D^K} - \frac{0.75}{f_D^{K_a}} - \frac{1}{f_C^K} + \frac{0.75}{f_C^{K_a}} \right) + \frac{D}{4} - \frac{C}{4} + K \right], \quad (34)$$

其中, 等式右边第一项为电离层残余噪声, 在低频频段有较大残余。在中高频段( $\geq 10$  mHz), 双差分信号的主要贡献为随机系统噪声。对比单载波星间距测量数据(式(9)), 双差分信号中随机噪声引起的信号涨落标准差与单载波测距数据中随机噪声的影响一致(由于  $D$  与  $C$  为独立随机变量, 其和或差  $D \pm C$  贡献相同幅度的噪声标准差)。如图 18 所示, GFO 双差分信号的振幅谱密度(蓝线)与微波测距系统噪

声指标(橙线)比对, 可实现对微波双向单程星间测距信号中残余的系统噪声水平的有效评估功能。

## 4 结论

本文针对低低跟踪重力卫星任务核心高精度星间微波测距系统的数据预处理与分析, 基于美国 JPL 和德国 GFZ 发布的 GFO 任务官方数据产品和

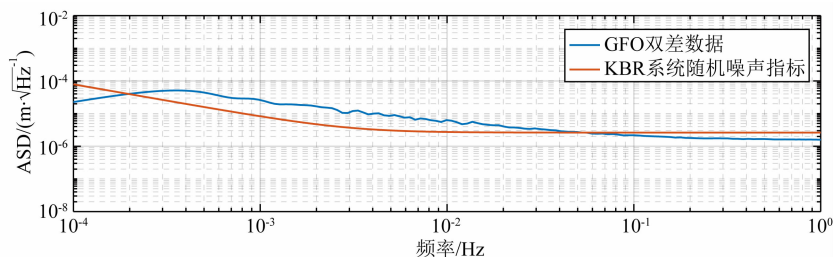


图 18 双差分信号振幅谱密度与 GFO 星载 KBR 系统噪声指标对比

Fig. 18 Comparison between the amplitude spectral density of the double-difference signal and the noise requirement of the KBR system for GFO

技术资料,研究了低低跟踪重力卫星 KBR 系统测距数据的预处理方法,完成了测距数据分析与评估方法的整理和构建,研发相关处理与分析程序,实现了 KBR 数据中载波频率不稳定性噪声的高效抑制、电离层影响消除、飞行时间偏差修正以及相位中心到质心修正等相关功能,最终实现 KBR 数据的有效处理与数据产品的生产.以 JPL 发布的数据产品作为比对参照,本文所处理的 KBR 数据产品与 GFO 官方产品高度吻合,两者残差远小于载荷设计精度,满足微波测距低低跟踪任务重力场反演处理的精度需求.同时,本文针对 KBR 最终数据产品中随机系统噪声等噪声,讨论了分析和评估的方法.

本文通过引入全新的电离层自由电子含量空间分布不均匀性的频域分析方法,利用星间微波测距数据,实现自由电子含量在不同空间尺度变化行为及其全球分布特征的分析能力,从新的视角为电离层的深入研究提供数据支撑.本研究针对 0.04~0.08 Hz 频带内的 Ka 波段电离层修正特征信号开展了初步分析.这一频带的信号对应电离层自由电子含量在百公里空间尺度的变化,研究发现该变化与太阳光照和地影交界区域强相关,同时验证了自由电子含量非均匀性变化的全球分布,尤其是极区分布与季节变化的高度关联性,肯定了频域分析方法的有效性.

综上所述,本文的研究为我国低低跟踪重力卫星任务核心星间微波测距系统的数据处理与分析提供了重要的技术积累和参考.

**致谢** 感谢美国喷气推进实验室 JPL 以及德国地学中心 GFZ 提供的 GRACE Follow-On 数据.

## References

Bacchetta A, Colangelo L, Canuto E, et al. 2017. From GOCE to NGGM: Automatic control breakthroughs for European future gravity missions. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1): 6428-6433,

doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1030.

Brunner F K, Gu M. 1991. An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations. *Manuscripta Geodaetica*, 16(3): 205-214.

Chwalla M, Danzmann K, Álvarez M D, et al. 2020. Optical suppression of tilt-to-length coupling in the LISA long-arm interferometer. *Physical Review Applied*, 14(1): 014030, doi: 10.1103/PhysRevApplied.14.014030.

Feng W, Lemoine J M, Zhong M, et al. 2012. Terrestrial water storage changes in the Amazon basin measured by GRACE during 2002-2010. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(3): 814-821, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.011.

Feng W, Wang C Q, Mu D P, et al. 2017. Groundwater storage variations in the North China Plain from GRACE with spatial constraints. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(5): 1630-1642, doi: 10.6038/cjg20170502.

Francis S P, Shaddock D A, Sutton A J, et al. 2015. Tone-assisted time delay interferometry on GRACE follow-on. *Physical Review D*, 92(1): 012005, doi: 10.1103/PhysRevD.92.012005.

Frommknecht B. 2007. Integrated sensor analysis of the GRACE mission [Ph. D. thesis]. München: Technische Universität München.

Gong Y G, Luo J, Wang B. 2021. Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects. *Nature Astronomy*, 5(9): 881-889, doi: 10.1038/s41550-021-01480-3.

Han S C, Shum C K, Bevis M, et al. 2006. Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Science*, 313(5787): 658-662, doi: 10.1126/science.1128661.

Hu W R, Wu Y L. 2017. The Taiji Program in Space for gravitational wave physics and the nature of gravity. *National Science Review*, 4(5): 685-686, doi: 10.1093/nsr/nwx116.

Ince E S, Barthelmes F, Reißland S, et al. 2019. ICGEM-15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans. *Earth System Science Data*, 11(2): 647-674, doi: 10.5194/essd-11-647-2019.

Kim J. 2000. Simulation study of a low-low satellite-to-satellite tracking mission [Ph. D. thesis]. Texas: The University of Texas at Austin.

Kim J, Lee S W. 2009. Flight performance analysis of GRACE K-band ranging instrument with simulation data. *Acta Astronautica*, 65(11-12): 1571-1581, doi: 10.1016/j.actaastro.2009.04.010.

Kornfeld R P, Arnold B W, Gross M A, et al. 2019. GRACE-FO: The gravity recovery and climate experiment follow-on mission.

- Journal of Spacecraft and Rockets*, 56(3): 931-951, doi: 10.2514/1.A34326.
- Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. 2016. TianQin: A space-borne gravitational wave detector. *Classical and Quantum Gravity*, 33(3): 035010, doi: 10.1088/0264-9381/33/3/035010.
- Luo Z C, Zhou H, Li Q, et al. 2016. A new time-variable gravity field model recovered by dynamic integral approach on the basis of GRACE KBRR data alone. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(6): 1994-2005, doi: 10.6038/cjg20160606.
- Milyukov V K, Burdanov A V, Zhamkov A S, et al. 2020. Analysis of key technologies for a space geophysics mission: Required accuracies and engineering solutions. *Solar System Research*, 54(7): 610-620, doi: 10.1134/S003809462007014X.
- Ran J J, Xu H Z, Zhong M, et al. 2014. Global temporal gravity field recovery using GRACE data. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(4): 1032-1040, doi: 10.6038/cjg20140402.
- Reigber C, Lühr H, Schwintzer P. 2002. CHAMP mission status. *Advances in Space Research*, 30(2): 129-134, doi: 10.1016/S0273-1177(02)00276-4.
- Rummel R, Gruber T. 2010. Gravity and steady-state ocean circulation explorer GOCE. //Flechtner F M, Gruber T, Güntner A, et al eds. *System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques*. Berlin: Springer, 203-212.
- Sheard B S, Heinzel G, Danzmann K, et al. 2012. Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission. *Journal of Geodesy*, 86(12): 1083-1095.
- Shen X H, Zhang X M, Yuan S G, et al. 2018. The state-of-the-art of the China seismo-electromagnetic satellite mission. *Science China Technological Sciences*, 61(5): 634-642, doi: 10.1007/s11431-018-9242-0.
- Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, et al. 2004. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31(9): L09607, doi: 10.1029/2004GL019920.
- Tapley B D, Watkins M M, Flechtner F, et al. 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 9(5): 358-369, doi: 10.1038/s41558-019-0456-2.
- Thomas J B. 1999. An analysis of gravity-field estimation based on intersatellite dual-1-way biased ranging. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory.
- Wang C Q, Xu H Z, Zhong M, et al. 2015. An investigation on GRACE temporal gravity field recovery using the dynamic approach. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(3): 756-766, doi: 10.6038/cjg20150306.
- Wen H Y, Kruizinga G, Paik M, et al. 2019. Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On (GRACE-FO) Level-1 Data Product User Handbook. //JPL D-56935, JPL, NASA.
- Wieczorek M A, Neumann G A, Nimmo F, et al. 2013. The crust of the moon as seen by GRAIL. *Science*, 339(6120): 671-675, doi: 10.1126/science.1231530.
- Wu S C, Kruizinga G, Bertiger W. 2006. Algorithm theoretical basis document for GRACE Level-1B data processing VI. 2. //GRACE 327-741, JPL, NASA.
- Xiao Y, Xia Z R, Wang X T. 2006. Earth gravity field recovery from GRACE data. *Geomatic Science and Engineering* (in Chinese), 26(2): 8-10.
- Xiao Y, Xia Z R, Wang X T. 2007. Recovering the Earth gravity field from inter-satellite range-rate of GRACE. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 36(1): 19-25.
- Xiong C, Ma S Y, Yin F. 2014. Determination of mean electron density between GRACE A and B satellites with precise microwave ranging. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(5): 1366-1376, doi: 10.6038/cjg20140502.
- Xiong N L, Tang C C, Li X J. 1999. Introduction to Ionospheric Physics (in Chinese). Wuhan: Wuhan University Press.
- Yan Y H, Müller V, Heinzel G, et al. 2021. Revisiting the light time correction in gravimetric missions like GRACE and GRACE follow-on. *Journal of Geodesy*, 95(5): 48, doi: 10.1007/s00190-021-01498-5.
- Zhong M, Duan J B, Xu H Z, et al. 2009. Trend of China land water storage redistribution at medi- and large-spatial scales in recent five years by satellite gravity observations. *Chinese Science Bulletin*, 54(5): 816-821.

## 附中文参考文献

- 冯伟, Lemoine J M, 钟敏等. 2012. 利用重力卫星 GRACE 监测亚马逊流域 2002-2010 年的陆地水变化. *地球物理学报*, 55(3): 814-821, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.011.
- 冯伟, 王长青, 穆大鹏等. 2017. 基于 GRACE 的空间约束方法监测华北平原地下水储量变化. *地球物理学报*, 60(5): 1630-1642, doi: 10.6038/cjg20170502.
- 罗志才, 周浩, 李琼等. 2016. 基于 GRACE KBRR 数据的动力积分法反演时变重力场模型. *地球物理学报*, 59(6): 1994-2005, doi: 10.6038/cjg20160606.
- 冉将军, 许厚泽, 钟敏等. 2014. 利用 GRACE 重力卫星观测数据反演全球时变地球重力场模型. *地球物理学报*, 57(4): 1032-1040, doi: 10.6038/cjg20140402.
- 王长青, 许厚泽, 钟敏等. 2015. 利用动力学方法解算 GRACE 时变重力场研究. *地球物理学报*, 58(3): 756-766, doi: 10.6038/cjg20150306.
- 肖云, 夏哲仁, 王兴涛. 2006. 利用 GRACE 轨道和加速度数据恢复地球重力场. *测绘科学与工程*, 26(2): 8-10.
- 肖云, 夏哲仁, 王兴涛. 2007. 用 GRACE 星间速度恢复地球重力场. *测绘学报*, 36(1): 19-25.
- 熊超, 马淑英, 尹凡. 2014. 利用 GRACE 卫星精密微波测距确定星间平均电子密度. *地球物理学报*, 57(5): 1366-1376, doi: 10.6038/cjg20140502.
- 熊年禄, 唐存琛, 李行健. 1999. 电离层物理概论. 武汉: 武汉大学出版社.
- 钟敏, 段建宾, 许厚泽等. 2009. 利用卫星重力观测研究近 5 年中国陆地水量中长时间尺度的变化趋势. *科学通报*, 54(5): 816-821.