可在线访问：www.sciencedirect.com

ScienceDirect

《空间研究进展》xx（2023年）xxx-xxx

ADVANCES IN SPACE RESEARCH (a COSPAR publication)

www.elsevier.com/locate/asr

arXiv:2302.07681v1 [physics.space-ph] 15 Feb 2023

GRACE后续任务激光测距干涉仪中的单粒子翻转干扰

Malte Misfeldt[a, b, *], Pallavi Bekal[a, b], Vitali M¨uller[a, b], Gerhard Heinzel[a, b]

[a]马克斯·普朗克引力物理研究所，*Callinstraße 38，30167 Hannover*，德国[b]汉诺威莱布尼茨大学引力物理研究所，*Callinstraße 38，30167 Hannover*，德国

摘要

重力恢复与气候实验后续任务（GRACE-FO）卫星任务（2018年至今）搭载了新型激光测距干涉仪（LRI），这是一种技术验证器，用于验证激光干涉测量应用于卫星间测距测量的可行性。GRACE-FO任务延续了关于地球系统中质量分布变化的宝贵气候数据记录，该记录由最初的GRACE任务（2002年至2017年）开启。通过观测两颗低地球轨道卫星之间的距离变化，可以推导出质量分布；传统的K波段测距（KBR）利用K波段电磁波的干涉测量，而新型LRI则利用近红外电磁波的干涉测量。

本文识别了 LRI 相位测量中可能由辐射诱发的单粒子翻转（SEU）事件。我们模拟激光测距处理器（LRP）中的相位数据处理过程，并采用基于模板的拟合方法确定 SEU 的参数，再从测距数据中减去这些事件。在四年的激光测距干涉仪数据中，共识别并表征了 29 起此类事件。©2023 COSPAR。由爱思唯尔有限公司出版，保留所有权利。

*Ke*关键词：GRACE-FO；激光测距干涉仪；LRI；单粒子翻转；位翻转；宇宙辐射

1. 引言

正在执行的重力恢复与气候实验后续任务（GRACE-FO）空间任务由两颗几乎完全相同的编队飞行卫星组成，于2018年5月22日发射（Kornfeld 等人，2019）。GRACE-FO及其前身GRACE（2002年至2017年）的目标是通过观测作用于卫星的差分引力，研究地球系统内的质量重新分布（ffer-ential gravimetric pullon thesatellites(Wahr 等人，1998）。两颗卫星运行在相似的极轨道上，轨道高度约为490千米，沿轨间距为 220 ± 50 千米（Wahr 等人，2004；Kornfeld 等人，2019）。

GRACE-FO 双星搭载了 K波段测距（KBR；亦称微波仪器，MWI）和激光测距干涉仪（LRI），用于精确测量星间距离变化（Kornfeld 等，2019）。作为主要测距仪器的传统 KBR，可测量星间距离变化，噪声水平约为 1 µm/√Hz（傅里叶频率为 1 Hz 时）（Kornfeld 等，2019）。LRI 是一种技术验证器，采用异频近红外激光干涉测量进行测距（Sheard 等，2012）。它在轨运行四年多后仍表现良好，在傅里叶频率为 1 Hz 时，噪声水平为 200 pm/ √Hz（Abich 等，2019），精度比 KBR 高 5000 倍。

*通讯作者：电子邮箱： malte.misfeldt@aei.mpg.de(Malte Misfeldt)

https://dx.doi.org/10.1016/j.jasr.xxxx.xx.xxx 0273-1177/ © 2023年 COSPAR。由爱思唯尔有限公司出版。版权所有。

预印本已提交至《空间研究进展》2023年2月16日

对 KBR 或 LRI 的星间距离变化率观测，以及全球定位系统（GPS）接收机、加速度计和星敏感器的观测数据进行处理，并对海洋潮汐、固体地球潮汐及其他已知效应进行精确建模，可得到地球月度重力图，这是该任务的主要科学成果（Wahr 等，2004；Tapley 等，2004）。比较各个月份的数据与长期平均重力，可揭示气候研究所需的趋势和年度水文信号，例如冰盖加速融化、地下水储量耗竭、海平面上升收支闭合等（Tapley 等，2019）。LRI 仪器成功完成调试，是迈向激光干涉空间天线（LISA）任务的重要一步。该任务将采用类似的星间激光测距技术，在深空中的三艘航天器之间进行测量，以探测引力波（Amaro-Seoane 等，2017）。

本文研究了 LRI 的测距数据中的所谓单粒子翻转（SEU）。单粒子翻转是由于带电粒子或宇宙辐射与航天器上的电子设备相互作用，导致相位测量出现的短暂扰动。第 2 节讨论极地低地球轨道中的空间环境，并介绍辐射对电子设备产生影响的不同分类。第 3 节解释 LRI架构，特别关注发生单粒子翻转的激光测距处理器（LRP）。第 4 节对 LRP 内部的数字滤波链进行仿真并生成模板，然后在第 5 节中利用这些模板检测测得的相位数据中的实际单粒子翻转。第 6 节讨论所识别出的单粒子翻转，第 7 节总结并得出结论。

2. 空间环境

空间辐射环境会影响航天器上的电子设备。因此，空间电子设备通常会采取屏蔽或加固措施，以抵御这种辐射（Stassinopoulos &Raymond，1988）。航天器所处的空间环境受到地球磁场和外太空源的影响。太阳产生的辐射会受到其周期的影响，该周期为 11 年，其间太阳会发射出粒子流，通量不断变化，这种粒子流称为太阳风。太阳风由电子、质子和重离子组成（Nwankwo 等，2020）。银河宇宙射线是粒子通量的另一来源，由高能质子组成。它们来自太阳系之外，源于我们银河系的深处（Blasi，2013）。地球磁场捕获这些带电粒子，它们沿着磁力线运动（Van Allen，1959）。根据粒子种类的不同，它们分布在磁场的不同区域，例如范艾伦辐射带（Bosser，2017）。这是一个由两条同心辐射带组成的系统，高度范围约为 1000 千米至超过 60 000 千米（M´etrailler 等，2019）。

空间电子设备发生辐射相关事故的概率与地球磁场的空间变化有关。过去几年中，多个空间任务进行了原位测量，并将测量结果整合到所谓的 CHAOS模型中（该模型以空间任务 CHAMP、Ørsted 和 SAC-C 命名，Olsen等人 (2006）。目前可用的 CHAOS模型第7版还纳入了 SWARM任务的结果和地面数据（Finlay等人，2020）。南大西洋上空的低地球轨道（LEO）高度处磁场强度较低，这一区域通常称为南大西洋异常区（SAA）。在此，内范艾伦带靠近地球表面。与 GRACE-FO 类似，低地球轨道上的卫星通常在范艾伦带下方飞行，但可能会穿过南大西洋异常区。该区域以辐射水平高而闻名，也是卫星电子设备频繁发生辐射相关事件的地点。其中一种影响是单粒子翻转，约有 50% 的单粒子翻转发生在南大西洋异常区（Zhang等人，2021）。

当单个带电粒子与晶体管等电子元件相互作用时，会在半导体内留下一串电子-空穴对，并产生电流脉冲（Todd & Uznanski，2015年）。这种相互作用会导致硬错误或软错误：硬错误会造成严重故障，甚至导致设备损坏；软错误则是暂时性的，不会造成破坏。因此，单粒子翻转属于软错误。它们可能会改变存储单元中存储的位值（Todd & Uznanski，

2015年）。这种位翻转会持续存在，直到向存储单元写入新的位值。另一方面，单粒子闩锁（SEL）是一种硬错误，会使电子设备发生短路，后果可能非常严重（Rivetta et al.，2001年）。GRACE卫星是GRACE-FO的前身。2002年，其一艘航天器上的一个仪器控制单元发生故障，这可能是由单粒子闩锁造成的（Pritchardet al.，2002年）。

3. LRI架构

LRI 是一种分布在两艘装备相同的航天器上的单一仪器，这两艘航天器分别称为 GF-1 和 GF-2，用于测量航天器之间的有偏测距。该仪器采用主动转发器配置（Sheard 等，2012）：两个单元中的一个（参考单元）发射一束光功率约为 25 mW 的激光束，并使用庞德-德雷弗-霍尔技术将其稳定到参考腔（Drever 等，1983；Thompson 等，2011）。由于两艘航天器之间的相对运动，当发射光场在远处的转发器航天器上被探测到时，其频率会发生 $f_D < 3$MHz 的多普勒频移（Sheard 等，2012）。在转发器单元上，由于高斯光束的发散以及接收端孔径较小，入射光束的光功率仅为皮瓦至纳瓦量级。转发器激光器由反馈回路控制，使入射光束以明确的相位关系再现，同时在发回参考航天器之前放大其功率。转发器单元还会有意引入 $f_{off} = 10$MHz 的频率偏移。返回途中产生的第二次多普勒频移由参考航天器探测。最终，参考端测量本地振荡器与往返光束之间的干涉，并以拍频 $f_R = 2f_D + f_{off}$ 表示。由于频率偏移 f_{off} 已知，因此可以从测得的频率 f_R 中提取距离信息和以多普勒频移 f_D 表示的重力信息。原则上，转发器航天器上的 LRI 测得的相位变化为零，只有明确的相位斜坡例外；这是因为前述反馈回路实现了频率偏移。

在 LRI 中，主要计算引擎称为 LRP，由喷气推进实验室（JPL）研制（Bachman等，2017）。它搭载了相位读出电子设备，以及用于激光器、腔体、转向镜等的控制回路。本文重点关注数据采集和处理链，并假设其工作方式如图1所示。两艘航天器上的干涉光相位由象限光电二极管（QPD）探测，从而能够利用每艘航天器的四个相位通道获取测距和光束倾斜信息（Sheard等，2012）。光电流在光学平台电子设备中转换为电压，并以约 40 兆赫的速率进行数字化；随后，LRP 内的全数字锁相环提取相位信息，参见例如（Ware等，2006；Wand等，2006）。GF-1 的标称数字化时钟频率为 38.656 000 MHz，GF-2 为 38.656 792 MHz。相位提取由现场可编程门阵列（FPGA）和处理器分担：FPGA 执行 IQ解调、滤波以及抽取，将采样率降至 9.664 kHz（GF-2 为 9.664 198 kHz）；处理器则提取测距相位$\varphi = \arctan(I/Q)$，之后再通过两级低通滤波和抽取链进一步抽取。两艘航天器上的四个相位通道分别独立运行整条相位提取和抽取链。处理器中的抽取包括两个有限脉冲响应滤波器（A 和 B，长度分别为 l_A 和 l_B）以及两个抽取器，抽取因子分别为 100 和 10，从而得到最终数据速率 9.664 Hz（GF-2 为 9.664 198 Hz），相位数据以该速率传输至地面。抽取前进行滤波是必要的，以防止较高频率混叠（Ware等，2006）进入 2 mHz 至 0.1 Hz 的测量频带（Dahl等，2017）。滤波器 A 和 B 各由数百个寄存器（标记为 m）及相应的滤波器系数（Ware等，2006）构成，且 $l_A > l_B$。滤波器系数 $c_{A/B}$ 包含此类滤波器的脉冲响应。三个滤波器的相位延迟相加，得到总滤波延迟 28 802 038 个时钟计数 ≈ 0.745 s（Wen等，2019）。与 LRP 制造商 JPL 讨论后，我们认为处理器中的两个有限脉冲响应滤波器 A 和 B 最有可能是辐射诱发的单粒子翻转的来源，因为

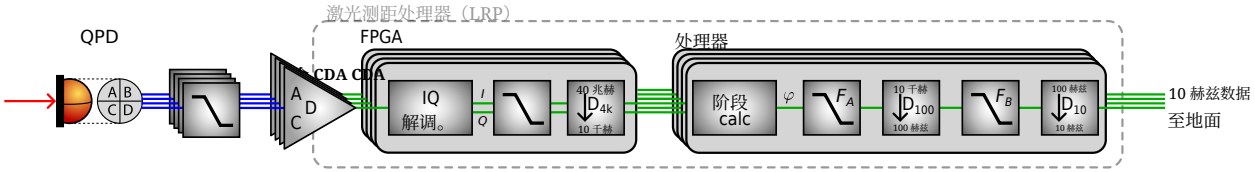


图 1. 相位计处理链。四象限光电二极管及其电子设备将光信号转换为电压。电压经过滤波，并以约 40 兆赫的速率数字化，然后送入现场可编程门阵列，由其对信号进行解调。处理器提取相位，并在其中进一步进行滤波和抽取。处理器中的低通有限脉冲响应滤波器长度分别为l_A 和l_B，后续抽取的因子分别为 100 和 10。图中所示的所有元件均针对每艘航天器上的四个相位通道独立实现。红线表示光信号，蓝线表示模拟电子信号，绿线表示数字信号。

与辐射相比，FPGA 预计比处理器存储器具有更强的抗辐射能力；目前可用的航天级 FPGA 甚至在硬件中实现了错误检测和纠正功能，参见例如 RTG4 FPGA 系列（美高森美科技公司，2022年）。

下文为简洁起见，在正文和示意图中将使用近似频率值（例如用 40 兆赫代替 38.656 兆赫），而仿真和数据分析则使用精确值。

4. 事件仿真

在时域仿真中，计算了有限脉冲响应滤波器链的输出。仿真的框图如图 2 所示。在单个时间步长内，滤波器响应等于所有寄存器值m_i与其中所含数据 φ的乘积，再乘以对应滤波器系数$c^i{}_{A/B}$，并将这些乘积求和。进入下一个时间步长时，寄存器值向右移动一个样本，寄存器m_0 则从输入相位数据中接收一个新值。

我们通过将简单的滤波器输入设为 $\varphi \equiv 0$，即不包含任何测距信号，来仿真单粒子翻转引起的比特翻转的影响，以便仅获得一次位翻转造成的扰动，并假设由于有限脉冲响应滤波器的线性特性，该扰动会叠加到经过常规滤波的信号上。因此，在发生位翻转时，我们在仿真执行期间将第 m 个寄存器从 0 置为 1。如果单粒子翻转发生在滤波器 A 中，那么它随后会传播经过后续的滤波器和抽取级。在滤波器 A 中对 0^{th}寄存器的操控，等价于将输入阶段 φ 的一个样本设为 1。然而，对更高阶寄存器的操控无法由等效输入数据 φ替代。所有中间数据流都会被计算出来，其中 F_A 表示第一个滤波器的输出，该输出随后以 100 倍因子进行抽取（记为D_{100}）。第二个滤波器的输出为 F_B，其在 10 Hz 数据率下的抽取结果称为D_{10}。

我们将位翻转的定义参数确定为：

- 受影响的滤波器（A 或 B）。
- 单粒子翻转的发生时间，以样本编号或滤波器时钟频率下的时钟计数$k_{\text{A/B}}$ 表示。由于F_A 或F_B 到 10 Hz 输出数据率的抽取率固定（$1000 = 100 \cdot 10$ 分别为 10），变化的k 对应的输出会重复。因此，若单粒子翻转发生在滤波器 A 中，我们使用$k_{\text{A}} \in [0, 1000) \subseteq \mathbb{N}_0$；若发生在滤波器 B 中，则使用$k_{\text{B}} \in [0, 10) \subseteq \mathbb{N}_0$。此时，$k$ 可视为 10 Hz 输出数据中两个数据样本之间的子样本时间。
- 滤波器受影响的寄存器编号$m_{\text{A}} \in [0, l_{\text{A}}) \subseteq \mathbb{N}_0$ 或$m_{\text{B}} \in [0, l_{\text{B}}) \subseteq \mathbb{N}_0$。通常以占滤波器总长度$l_{\text{A/B}}$的百分比表示该编号。
- 发生翻转的位数$b \in [0, 64) \subseteq \mathbb{N}_0$，属于假定的 64 位寄存器（即翻转位的 2_b 大小）。在仿真中，通常使用$b = 0$，因为该参数是线性比例因子，可以通过最小二乘算法轻松估算。

我们将 $\varphi = 0$ 作为初始条件，并模拟从 0 到 1 的位翻转。不过，也可以将$\varphi = 1$ 初始化，并模拟从 1 到 0 的位翻转。这会使输出数据的形状相同，但符号相反。图 3 展示了一个单粒子翻转的仿真示例：事件发生在第一个滤波器（A）的第一个寄存器（$m =$

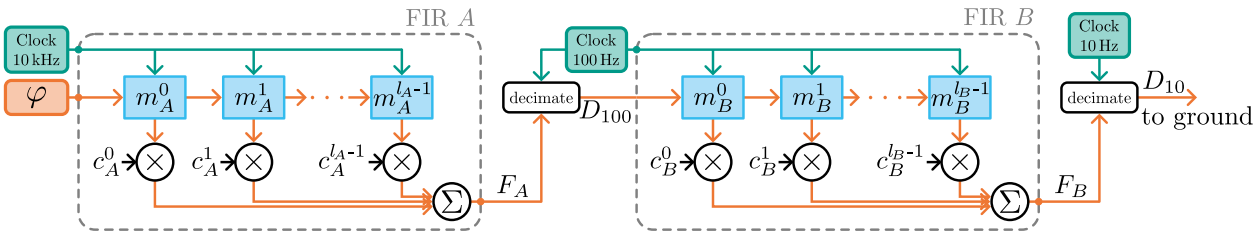


图 2. 两个有限脉冲响应滤波器的框图 阶段（按仿真实现）。绿色表示时钟信号，橙色表示相位数据，蓝色表示 tes
存储单元。有限脉冲响应滤波器系数（ $c^{i}_{A/B}$）与寄存器中的数据点相乘，滤波后的结果为所有乘积之和。

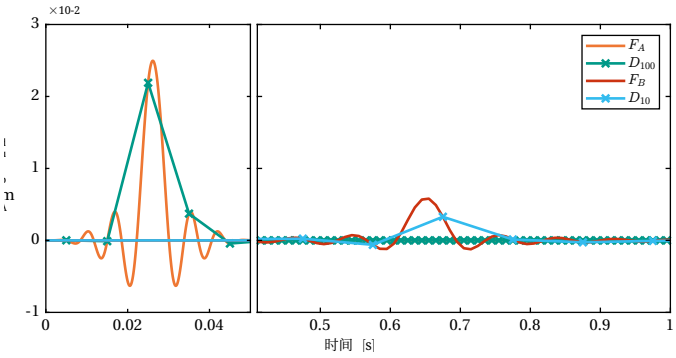


图 3. 第一有限脉冲响应滤波器发生单粒子翻转时，滤波链中的模拟数据；注入采样点和寄存器编号为 $k = m = 0$，幅度为 $a = 1$。输入数据 φ 为零，因此未显示。第一个滤波器F_A 的输出（橙色）以 10 kHz 采样；第一次抽取 D_{100} （绿色）和第二个滤波器F_B 的输出（红色）以 100 Hz 采样；最终输出 D_{10} （青色）以 10 Hz 采样。两个时间轴的单位都是秒，但请注意它们的刻度不同。这些示例使用的是人为设定的滤波器系数，因为很遗憾，无法在此披露在轨使用的确切系数。

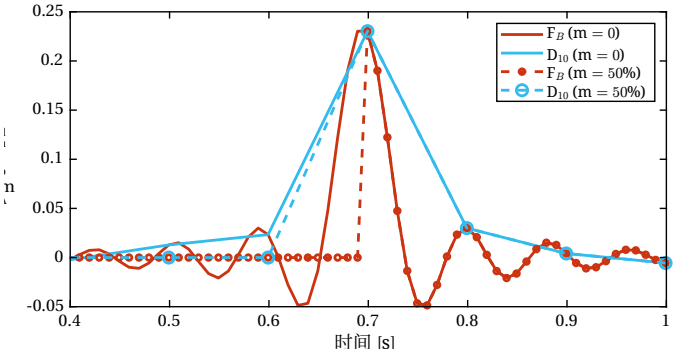


图 4. 模拟数据展示了第二个滤波器中较高寄存器编号发生单粒子翻转时的影响。实线表示脉冲通过整个滤波器时的响应（即，对于 $m = 0$）；虚线表示单粒子翻转在滤波器中部影响寄存器 $m = 50\%$ 时的响应。颜色编码与图 3 相同。请注意，此处的幅度大于图 3，因为这次单粒子翻转模拟发生在第二个而非第一个有限脉冲响应滤波器中。这些示例使用的是人为设定的滤波器系数，因为很遗憾，无法在此披露在轨使用的确切系数。

0）中，时间为$k_A = 0$。橙色和绿色表示经过第一个滤波器后的中间数据流，红色表示第二个滤波器的输出，青色表示最终的 10 Hz 输出数据。较大的注入采样点$k_A > 0$会导致F_A 的延迟，因此，由于F_B的采样不同，后续数据流的形状和振幅会略有不同。

当较低的寄存器编号 m 受到位翻转影响时，这意味着几乎完整的滤波器脉冲响应会出现在即时输出中，如图 4 中的实线所示，其中红线表示滤波器 B 在 100 Hz 下的即时输出，蓝线表示 10 Hz 下抽取后的数据。较高的寄存器编号 m 会导致即时输出中的滤波器响应被截断，如图 4 中的虚线所示。对于滤波器 A 中较高的寄存器编号 m，10 Hz 输出数据不会显得被截断，因为截断并抽取后的滤波器输出D_{100} 会在F_B中再次经过滤波，最终由此主导输出 D_{10}的形状。

对于固定的寄存器编号 m，输出D_{10} 可能呈现截然不同的形状，具体取决于在数据中的哪个时间点或样本k 发生了单粒子翻转。根据采样率抽取因子，若单粒子翻转发生在第一个滤波器 A 中，10 Hz 输出数据流有 1000 种独特模式；若发生在第二个滤波器 B 中，则有 10 种模式。滤波器 B 的这 10 种模式大致是滤波器 A 的 1000 种模式的子集，因为滤波器 A 的输出D_{100} 近似只有一个峰值，随后该输出会馈入滤波器 B。

根据仿真结果，针对滤波器 A 或 B 中发生的事件，分别创建了两个查找表（LUT）。在仿真中，单粒子翻转注入滤波器时的注入样本编号 k 和寄存器编号 m 在参数空间内变化。第二次抽取后的输出数据，即 10 Hz 下的数据，存储在查找表中。完整的三维查找表的维度分别为$1000 \times l_A \times 15$ 和 $10 \times l_B \times 15$，其中第一维表示注入样本编号 k，第二

维表示寄存器编号m，第三维表示D_{10}中 10 Hz 下完整滤波器响应的数据点总数。查找表的各行记作 $\mathrm{LUT}^{k,m}{}_{\mathrm{A/B}}$。为便于阅读，下文省略下标 A/B；通常这表示所有方程均分别针对两个查找表进行计算。

由于真正的 LRP 内部滤波器系数只能在项目内部获取，我们在图 3 和图 4 中使用示例有限脉冲响应滤波器来展示其原理。然而，以下对实际飞行数据的分析使用的是真正的在轨 LRP 滤波器系数。

5. LRI 阶段数据中的单粒子翻转检测

单粒子翻转检测算法是阿尔伯特·爱因斯坦研究所（位于汉诺威）开发的一套更大型框架的一部分，该框架可近实时地自动处理和分析 LRI 数据（Mis-feldt，2019）。该框架包含一个异常值检测模块，最初用于消除推进器引起的相位跳变（Abich 等人，2019），如今已扩展为识别单粒子翻转。整个流程分为两步：首先，检测并分类所有相位扰动事件。如果测量相位的一阶导数（即相位变化率）出现大于±30mHz 的阶跃，或者差分波前传感（DWS）组合出现大于 2×10^{-4}周/s 的异常值，则将其标记为潜在的相位扰动事件。随后进行建模和减法处理。判断相位扰动是单粒子翻转而非由光学或机械扰动造成的真实相位跳变，依据是单粒子翻转只发生在一个通道中，因为四个通道的滤波和抽取是分别进行的。相比之下，相位跳变会影响全部四个通道；此外，单粒子翻转会产生短暂的峰值（扰动经过滤波器后便会消失），而相位跳变会在测距数据中造成持续的阶跃（这是快速激光频率变化的积分不为零所致，参见 Mis-feldt (2019)）。识别出单粒子翻转候选事件后，从受影响通道的测量相位数据中提取一段长度为 $N \leq 30$ 个样本的数据。随后，从受影响通道中减去其余三个未受影响通道的平均值，以受影响通道，从而去除共模（测距）信号，并提取单粒子翻转的清晰特征。我们将提取出的位翻转信号记为 $\varphi(\mathrm{t}_i)$ 或 φ_i，其中 t_i 表示离散时间样本，i 为样本编号。例如，若单粒子翻转发生在通道 C 中，则$\varphi(\mathrm{t}_i) = \varphi_C(\mathrm{t}_i) - (\varphi_A(\mathrm{t}_i) + \varphi_B(\mathrm{t}_i) + \varphi_D(\mathrm{t}_i))/3$。此表达式还可抑制共模噪声，例如参考端的激光频率噪声。关于 LRI 的测量噪声，Müller 等人（2022年）有更详细的讨论。

我们介绍单粒子翻转相位的模型

$$\eta_i^{k,m}(a) = \eta^{k,m}(a,t_i) = a\cdot \mathrm{LUT}^{k,m}(t_i)\,, \tag{1}$$

该模型本质上是一个经振幅 a 缩放的查找表条目，以及残差

$$\begin{aligned} r_i^{k,m}(\boldsymbol{\vartheta}) &= r\left((a,c_2,c_1,c_0)^{\mathsf{T}},t_i\right)\\ &= \varphi_i - \eta_i^{k,m}(a) - c_2\cdot t_i^2 - c_1\cdot t_i - c_0\,, \end{aligned} \tag{2}$$

其中我们进一步减去一个二阶多项式，该多项式可能仍存在于数据 φ 中，原因可能是（测距）信号去除不充分或类似效应。该方程定义了回归系数 $\boldsymbol{\vartheta} = (a、c_2,c_1,c_0)^{\mathsf{T}}$。

为评估$k\times$个查找表中的模型中，哪一个与数据最为吻合，我们采用最大似然估计框架。首先，根据测量数据计算 $\boldsymbol{\vartheta}$ 的似然 φ，如（Koch，1999）所示

$$\mathcal{L}^{k,m}(\varphi\,|\,\boldsymbol{\vartheta}) = \frac{1}{\sqrt{|2\pi\Sigma|}}\cdot\exp\left(-\frac{1}{2}r^{k,m}(\boldsymbol{\vartheta})^{\mathsf{T}}\,\Sigma^{-1}\,r^{k,m}(\boldsymbol{\vartheta})\right). \tag{3}$$

协方差矩阵 Σ 将在后文讨论。通过在参数空间内取似然函数 $\mathcal{L}$ 的最大值，或等价地取其负对数的最小值，可以确定最佳拟合模型 $\eta^{k,\,m}(a)$

$$\ell^{k,m}(\varphi\,|\,\boldsymbol{\vartheta}) = -\ln\mathcal{L}^{k,m}(\varphi\,|\,\boldsymbol{\vartheta}) \tag{4}$$

$$= \frac{1}{2}\ln(|2\pi\Sigma|) + \frac{1}{2}r^{k,m}(\boldsymbol{\vartheta})^{\mathsf{T}}\cdot\Sigma^{-1}\cdot r^{k,m}(\boldsymbol{\vartheta})\,. \tag{5}$$

参数空间对于参数k 和m是离散的，对于 $\boldsymbol{\vartheta}$ 则是连续的。因此，我们通过广义最小二乘法，对所有k、m 最小化负对数似然 $\ell^{k,m}$，

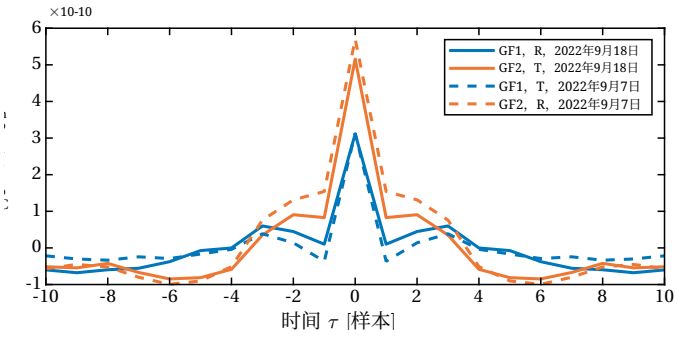


图 5. GF-1 和 GF-2 在不同日期、不同角色下，单个通道相位组合 $\varphi_A - (\varphi_B + \varphi_C + \varphi_D)/3$ 的示例自相关。

也就是说，通过估计

$$\hat{\boldsymbol{\vartheta}} = \underset{\boldsymbol{\vartheta}}{\operatorname{argmin}}\, r^{k,m}(\boldsymbol{\vartheta})^{\mathsf{T}} \cdot \Sigma^{-1} \cdot r^{k,m}(\boldsymbol{\vartheta})\,. \tag{6}$$

最终，通过在二维$k \times m$大小的网格中寻找 $\ell^{k,m}\left(\varphi \mid \hat{\boldsymbol{\vartheta}}\right)$ 的最小值，确定 SEU模型的最佳估计值。

计算广义最小二乘所需的协方差矩阵 Σ（参见公式（6））由测量噪声n 的期望值 E 推导得到，表示为

$$\Sigma_{ij} = \mathrm{E}[n_i \cdot n_j] = R_n(t_i - t_j)\,. \tag{7}$$

这里，期望值 E 可以通过长度为N 的（实值）数据n 的无偏相关函数计算得到，表示为

$$R_n(\tau) = \begin{cases} \dfrac{1}{N-\tau} \displaystyle\sum_{i=0}^{N-\tau-1} n_{i+\tau} n_i\,, & \tau \geq 0 \\ R_n(-\tau)\,, & \tau < 0\,. \end{cases} \tag{8}$$

相关函数通过在不存在单粒子翻转事件时对实际相位数据进行自相关得到。图 5 显示了两艘航天器在两种角色下，连续数据片段中长度为 30 个样本的 20 000 个自相关结果的平均值。在计算每个自相关之前，已从相位数据中去除趋势项。GF-1 和 GF-2 的函数形状略有不同，而在不同角色（参考航天器或转发器）下的不同日期之间，其幅值变化并不显著。实线的值被用作相关函数$R_n(\tau)$，以根据测量噪声n构成协方差矩阵 Σ。

根据查找表行的拟合振幅a，我们可直接获得单粒子翻转在

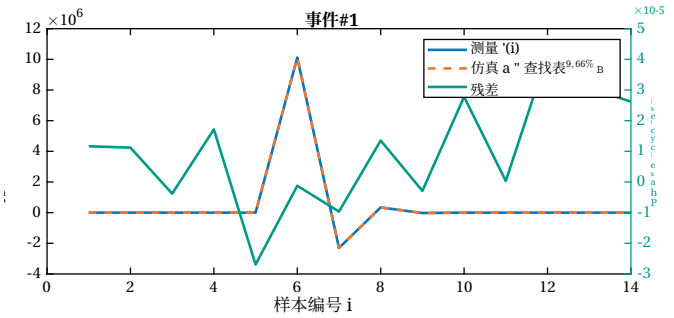


图6。事件#1：单粒子翻转拟合效果良好的示例。蓝色曲线显示了2018年7月9日协调世界时约18:25时，GF-2上D通道相位数据中分离出的片段。滤波器 B的寄存器67% $\cdot l_B$的位$b = 60$发生了单粒子翻转（橙色虚线），将其减去后得到绿色残差（比例参照右轴）。减法后的噪声约为 10^{-5} 周。

滤波前发生时的振幅和符号。我们还可以计算受影响位的位数b，方法是

$$b = \log_2\left(10 \cdot 2^{24} \cdot a\right)\,, \tag{9}$$

其中，$1/(10 \cdot 2^{24})$是LRI相位测量中以相位周为单位的最低有效位（Wen 等人，2019）。理想情况下，b 会得到一个整数。

上述计算针对两个滤波器查找表中的所有模板分别进行（查找表$^{k,\ m}{}_{\mathrm{A}}$ 和查找表$^{k,\ m}{}_{\mathrm{B}}$）。我们比较两个查找表中的最小对数似然值，以确定发生单粒子翻转时最可能使用的滤波器（A或B）。

6. 讨论

在所分析的任务时段（从2018年6月持续至2022年12月底）内，LRI有超过75%的时间处于科学模式。我们在LRI相位数据中识别出29个单粒子翻转事件，其参数如表1所示。图6展示了一个典型的单粒子翻转事件（表中的#1）的时间序列、拟合模型及相应的残差。

在所有事件中，GF-1记录到14起，GF-2记录到15起。由于参考端/转发器的角色可以互换，LRI转发器单元检测到16起，参考端单元检测到13起。四个通道的分布几乎相同（A：8起，B：6起，C：8起，D：7起）。滤波器 A 检测到的事件更多（19起，而滤波器 B 为10起）。这是预期之中的，因为滤波器 A 的寄存器更多$l_A > l_B$，也就是说，电子设备中可能受到辐射击中的物理面积更大。鉴于 LRI

在2019–2021年，超过85%的时间处于科学模式，因此预计每年约发生9起事件。2018年和2022年，LRI有很长时间未处于科学模式，因此观测到的事件较少。观测到的最小事件发生在 29^{th} 位（事件 #28）。因此，我们认为低位数处实际上发生的单粒子翻转事件更多，但它们无法从 LRI 噪声中检测出来。

单粒子翻转事件发生时航天器地面轨迹位置的分布（见图7）显示，这些事件如预期般集中在南大西洋异常区，近50%的事件发生于此。这与文献中的研究结果一致（Zhang等人，2021年）。

从测距数据中减去单粒子翻转特征通常效果良好，因为在大多数情况下，残差的均方根约为 10^{-5}周，这一数值处于相位测量系统的噪声水平（参见M¨uller等人(2022年）。

我们明确排除了单粒子翻转也可能改变滤波器系数这一可能性。系数发生位翻转会导致滤波器增益和噪声抑制发生变化。不过，具体影响也很大程度上取决于 LRP 中的架构和实现。

表1。LRI相位数据中检测到的单粒子翻转参数。Ch 表示受影响的相位通道；；表示事件的子采样时序；；表示事件的子采样时序；；表示受影响的寄存器（以寄存器总数归一化/A/B）；；表示发生位翻转的位；Dir 表示位翻转方向（0 → 1 （↑）或 1 → 0 （↓）。位数的 95% 置信区间（CI）根据最小二乘拟合的形式误差并假设服从高斯分布计算得出，取噪声标准差的 1.96 倍。彩色位位置单元格的含义如下：绿色：分数位数可由同时发生的两次位翻转很好地解释。黄色：分数位数可能可由同时发生的两次以上位翻转解释。灰色：观测到较大的残差（见正文第 6.2 节）。横线用于分隔不同年份。

#	事件时间 [协调世界时]	SC	Role	Ch	FIR	k	m [%]	Dir	位编号b int+frac	95%置信区间 位编号 b	残差 [周均方根]
1	2018年7月9日 18:25:01	GF-1	T	D	B	9	66	↑	60 [illegible]	$\pm 4.29 \times 10^{-12}$	1.33×10^{-5}
2	2019年1月20日 09:31:55	GF-1	R	D	A	296	31	↑	35	$\pm 1.49 \times 10^{-4}$	9.09×10^{-6}
3	2019年4月1日 16:36:27	GF-2	T	B	A	352	0	↓	46 [illegible]	$\pm 6.20 \times 10^{-4}$	7.42e-02
4	2019年4月18日 23:38:38	GF-2	T	C	A	165	37	↑	63 [illegible]	$\pm 2.13 \times 10^{-12}$	2.53×10^{-5}
5	2019年9月9日 00:07:28	GF-2	T	A	B	4	6	↓	30 8.75e-02	$\pm 3.59 \times 10^{-5}$	7.36×10^{-6}
6	2019年11月13日 23:31:24	GF-1	R	D	A	316	67	↓	53 2.12e-01	$\pm 2.43 \times 10^{-8}$	1.03×10^{-5}
7	2019年11月20日 03:09:38	GF-1	R	A	A	309	49	↓	50 [illegible]	$\pm 1.07 \times 10^{-7}$	1.11×10^{-5}
8	2019年11月25日 15:30:17	GF-1	R	C	B	1	65	↓	34 [illegible]	$\pm 3.59 \times 10^{-4}$	8.39×10^{-6}
9	2020年1月6日 06:13:57	GF-2	T	C	B	4	56	↓	41 [illegible]	$\pm 4.87 \times 10^{-3}$	1.71e-01
10	2020年2月1日 16:24:25	GF-2	T	A	A	299	31	↑	33	$\pm 4.42 \times 10^{-4}$	5.66×10^{-6}
11	2020年3月22日 00:51:54	GF-1	R	A	A	797	51	↑	35	$\pm 1.46 \times 10^{-2}$	3.88×10^{-5}
12	2020年5月1日 08:07:03	GF-1	R	C	A	646	0	↓	32	$\pm 1.35 \times 10^{-3}$	1.06×10^{-5}
13	2020年5月30日 09:31:44	GF-1	R	A	A	394	32	↓	59 [illegible]	$\pm 1.18 \times 10^{-11}$	1.06×10^{-5}
14	2020年8月17日 23:27:50	GF-1	R	A	B	1	86	↑	39 2.56e-01	$\pm 2.54 \times 10^{-3}$	8.27×10^{-6}
15	2020年9月7日 01:47:43	GF-2	T	A	B	6	0	↑	37 [illegible]	$\pm 1.09 \times 10^{-6}$	2.35×10^{-5}
16	2020年9月12日 02:17:38	GF-1	R	B	A	974	16	↑	29	$\pm 8.84 \times 10^{-3}$	8.89×10^{-6}
17	2020年12月11日 18:06:47	GF-2	T	D	A	903	30	↑	49	$\pm 7.84 \times 10^{-9}$	9.22×10^{-6}
18	2020年12月19日 04:44:29	GF-2	T	B	A	370	76	↓	54 2.73e-01	$\pm 8.71 \times 10^{-9}$	7.46×10^{-6}
19	2021年3月9日 11:18:40	GF-2	T	D	B	3	35	↓	51 [illegible]	$\pm 3.96 \times 10^{-11}$	1.61×10^{-5}
20	2021年3月10日 18:20:28	GF-2	T	D	A	218	47	↓	39 [illegible]	$\pm 8.57 \times 10^{-5}$	1.22×10^{-5}
21	2021年3月12日 23:20:11	GF-2	R	C	A	434	24	↑	37	$\pm 2.90 \times 10^{-5}$	8.18×10^{-6}
22	2021年7月25日 00:27:50	GF-2	T	B	B	0	23	↑	51 [illegible]	$\pm 6.20 \times 10^{-11}$	2.58×10^{-5}
23	2021年9月30日 19:46:16	GF-2	T	A	A	57	0	↑	44 [illegible]	$\pm 5.13 \times 10^{-7}$	2.13×10^{-5}
24	2021年11月16日 16:25:26	GF-2	T	C	A	18	7	↓	45 [illegible]	$\pm 3.65 \times 10^{-7}$	2.23×10^{-5}
25	2021年12月5日 04:06:04	GF-1	R	C	A	454	60	↑	38	$\pm 3.05 \times 10^{-4}$	9.73×10^{-6}
26	2022年1月27日 22:21:58	GF-1	R	B	B	7	32	↓	51 [illegible]	$\pm 1.84 \times 10^{-11}$	7.06×10^{-6}
27	2022年6月4日 15:21:35	GF-1	T	D	A	721	46	↑	63 [illegible]	$\pm 3.70 \times 10^{-12}$	1.09×10^{-5}
28	2022年11月7日 12:32:14	GF-1	R	C	B	9	66	↓	29 8.51e-03	$\pm 1.20 \times 10^{-2}$	1.91×10^{-5}
29	2022年11月22日 22:27:29	GF-2	T	B	A	542	2	↑	63 [illegible]	$\pm 1.23 \times 10^{-12}$	1.96×10^{-5}

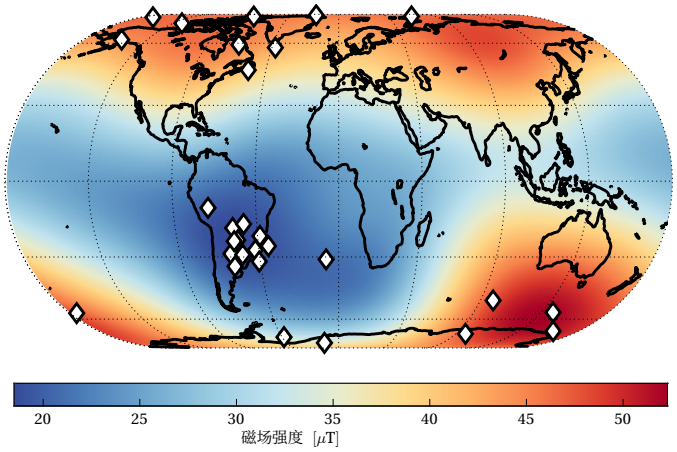


图7. 世界地图显示了发生单粒子翻转时GRACE-FO航天器的位置（菱形）。颜色表示地球表面上方490 km高度处的磁场强度，单位为μT，该数据根据2021年1月的CHAOS-7模型推算得出（Finlay等人，2020）。有证据表明，南大西洋异常区内发生的单粒子翻转数量有所增加。

6.1. 非整数位数

一些事件的位数 b 在 95% 置信区间内并非整数，在表 1 中以不同颜色标示。尽管非整数位数乍看起来有悖直觉，但如果考虑不同位同时发生位翻转，这种情况便可以解释。这会增大或减小信号振幅，从而改变所测得的位数 b （参见公式 (9) ）。通过拟合得到的允许小数位数仅取决于受影响位之间的间隔：

$$O_{\pm}(n) = \log_2(2^b \pm 2^{b-n}) - \log_2(2^b)\,. \qquad (10)$$

带 2^{b-n}项的符号表示位置$b–n$ 处低位相对于高位b的翻转方向，该方向在表1中有所标示。前12个允许的小数位值如表2所示。请注意， $O_+(1)$和 $O_-(2)$是简并的，并且位b和 $b-1$沿不同方向翻转时，无法与$b-1$位的单次翻转区分开来。将表2中的允许小数位数与表1“位数 b”列中的值进行比较，可以通过多位翻转解释若干事件。例如，对于事件#5，我们观测到$O_+(4)$（第30位和第26位沿同一方向翻转）。所有这些事件均标记为绿色。表2中的数值无法直接解释标记为黄色的事件。

表2. 两次同时发生位翻转时的分数位数，随位数间隔的变化。数字n 表示第二个位的位置$b-n$，相对于位于b处的位，$b > n$。

n	$O_+(n)$	$O_-(n)$
1	0.58496	−1
2	0.32193	−0.41504
3	0.16993	−0.19265
4	0.08746	−0.09311
5	0.04439	−0.04580
6	0.02237	−0.02272
7	0.01123	−0.01131
8	0.00562	−0.00565
9	0.00282	−0.00282
10	0.00141	−0.00141
11	0.00070	−0.00070
12	0.00035	−0.00035

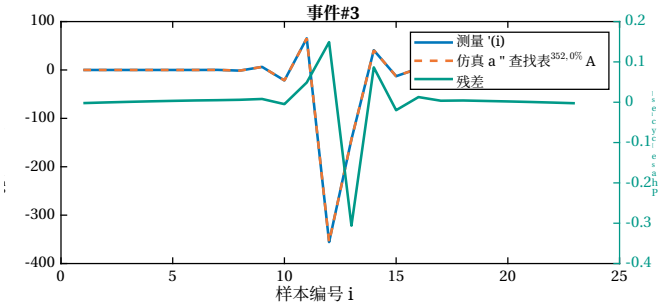


图8。事件#3：残差呈现出类似第二次单粒子翻转的形状。

然而，在同时考虑多于两次的位翻转时，可以解释这些分数位位置。事件#10的小数位数为 $-0.159 \approx O_-(3) + O_+(5)$，表示 31st、 28th 和 26th 位发生了位翻转。评估单粒子撞击引发两个位翻转的可能性，很大程度上取决于存储单元的具体架构和物理排列方式，而作者对此并不了解。

6.2. 其他事件

有两个事件的残差仍呈现出相对较大的均方根值（# 3 和 #9；标记为灰色）。它们的残差看起来像是另一个单粒子翻转事件，与初始事件相隔几毫秒。事件#3 在图8中进行了示例展示。曾进行过一次短暂实验，将这些残差再次输入拟合算法，但未能成功，可能是因为这两个事件同时存在于滤波器中，无法将其视为两个相互独立事件的简单叠加。

将查找表扩展到也能纳入此类事件超出了本研究的范围，并且会使查找表的大小和计算时间呈指数级增加。

7. 结论

本文介绍了一种方法，用于识别、提取和建模GRACE-FO任务中 LRI 测量相位数据里由单粒子翻转引起的扰动。我们解释了 LRP 中的滤波过程，并预计寄存器中的位翻转会通过低通有限冲激响应滤波器影响测量相位。此外，我们展示了模拟数据，并讨论了描述单粒子翻转所需的参数。最终，我们在三年多的 LRI测距数据中发现了29个事件。这些事件集中在南大西洋异常区附近。其中一些事件似乎源于多个位同时翻转，甚至可能存在轻微的时间延迟。

LRI相位数据中由辐射引起的单粒子翻转是罕见且持续时间很短的事件。因此，我们预计不予移除对反演重力场的影响极小，甚至没有影响。尽管如此，移除单粒子翻转后的LRI数据产品可在 https://www.aei.mpg.de/grace-fo-ranging-datasets获取。

本研究表明，可以在后处理中识别并去除此特定噪声源。未来的仪器或许可以通过采用抗辐射存储器或纳入纠错算法，克服这一导致短暂测量干扰的噪声源。

资金支持

本研究得到以下机构的支持：德国研究联合会（DFG，德国研究基金会，项目编号 434617780，SFB 1464）；卓越集群“QuantumFrontiers：量子前沿的光与物质：计量学基础与应用”（EXC-2123，项目编号：390837967）；欧洲空间局在下一代大地测量任务开发框架内提供的支持，以及欧洲空间局为 GRACE-FO 提供的第三方任务支持（RFP/3-17121/21/I-DT-lr）；马克斯·普朗克学会（MPG）为未来任务提供的支持（M.IF.A.QOP18108），以及 LEGACY 低频引力波天文学合作框架内的支持（M.IF.A.QOP18098）。

致谢

作者谨此感谢喷气推进实验室的 LRI团队，感谢他们定期进行的深入讨论并分享见解。

参考文献

Abich, K., Abramovici, A., Amparan, B. 等（2019）。GRACE后续任务激光测距干涉仪的在轨性能。《物理评论快报》，123(3)。doi: 10.1103/physrevlett.123.031101。Amaro-Seoane, P., Audley, H., Babak, S. 等（2017）。激光干涉空间天线。doi:10.48550/ARXIV.1702.00786。Bachman, B., de Vine, G., Dickson, J. 等（2017）。重力恢复与气候实验后续任务中的激光测距干涉仪飞行相位计。《物理学杂志：会议系列》，*840*, 012011 10.1088/1742-6596/840/ 。doi: 。1/012011
Blasi, P.（2013）。银河宇宙射线的起源。《天文学与天体物理学评论》，21(1)。doi:10.1007/s00159-013-0070-7。Bosser, A.（2017）。空间和大气辐射对存储器组件的单粒子效应。于韦斯屈莱大学博士论文。URL: 。Dahl, C., Baatzsch, A., Dehne, M. 等（2017）。GRACE后续任务上的激光测距干涉仪。载于 N. Karafolas、B. Cugny 和 Z. Sodnik（编），《国际空间光学会议——ICSO 2016》。SPIE。doi:10.1117/12.2297705。Drever, R. W. P., Hall, J. L., Kowalski, F. V. 等（1983）。使用光学谐振腔稳定激光相位与频率。《应用物理学B》，31(2)，97–105。doi:10.1007/BF00702605。Finlay, C. C., Kloss, C., Olsen, N. 等（2020）。CHAOS-7地磁场模型及南大西洋异常区的观测变化。《地球、行星与空间》，72(1)，156。doi:10.1186/s40623-020-01252-9。Koch, K.-R.（1999）。《线性模型中的参数估计与假设检验》。Springer Berlin Heidelberg。doi:10.1007/978-3-662-03976-2。Kornfeld, R. P., Arnold, B. W., Gross, M. A. 等（2019）。GRACE-FO：重力恢复与气候实验后续任务。《航天器与火箭杂志》，56(3)，931–951。doi:10.2514/1.A34326。美高森美科技公司（2022）。RTG4TM抗辐射FPGA。URL: https://www.microchip.com/en-us/products/fpgas-and-plds/radiation-tolerant-fpgas/rtg4-radiation-tolerant-fpgas 。

Misfeldt, M.（2019）。《GRACE后续任务激光测距干涉仪的数据处理与研究》。莱布尼茨汉诺威大学硕士论文。doi:10.15488/9639。M´etrailler, L., B´elanger, G., Kretschmar, P. 等（2019）。范艾伦辐射带的数据驱动建模：用于俘获电子的5drbm模型。arXiv, 。doi:10.48550/ARXIV.1907.11029。M¨uller, V., Hauk, M., Misfeldt, M. 等（2022）。比较GRACE-FO微波测距仪与LRI测距数据，重点关注载波频率变化。《遥感》，14(17)，4335。doi: 10.3390/rs14174335。Nwankwo, V. U.-J., Jibiri, N. N., & Kio, M. T.（2020）。空间辐射环境对近地空间卫星运行的影响。载于 V. Demyanov 和 J. Becedas（编），《地球科学卫星任务与技术》第5 10.5772/intechopen. 章。里耶卡：IntechOpen。doi: 。Olsen, N., L¨uhr, H., Sabaka, T. J. 等（2006）。基于CHAMP、Ørsted和SAC-C磁卫星数据构建的地球磁场模型CHAOS。《国际地球物理学杂志》，*166* 1 67 75 10.1111/j. ( )， – 。1365-246x.2006.02959.x doi: 。Pritchard, B., Swift, G., & Johnston, A.（2002）。航天器系统辐射效应的预测、观测与比较。载于《IEEE辐射效应数据研讨会》。IEEE。doi: 10.1109/redw.2002.1045525。

Rivetta, C., Allongue, B., Berger, G. 等（2001）。LHC实验用直流-直流转换器中的单粒子烧毁。载于 RADECS 2001。《2001年第六届欧洲辐射及其对元器件和系统影响会议》（目录号01TH8605）。IEEE。doi: 10.1109/radecs.2001.1159300。Sheard, B. S., Heinzel, G., Danzmann, K. 等（2012）。用于GRACE后续任务的星间激光测距仪。《大地测量学杂志》，86(12)，1083–1095。doi:10.1007/s00190-012-0566-3。Stassinopoulos, E., & Raymond, J.（1988）。电子设备所处的空间辐射环境。《IEEE会刊》，*76* 11 1423 1442 10.1109/5.( )，–。90113 doi:。Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M. 等（2004）。重力恢复与气候实验：任务概述与早期成果。《地球物理研究快报》，31(9)。doi: 10.1029/2004GL019920。Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F. 等（2019）。GRACE对理解气候变化的贡献。《自然·气候变化》，9(5)，358–369。doi:10.1038/s41558-019-0456-2。Thompson, R., Folkner, W. M., de Vine, G. 等（2011）。用于GRACE后续任务激光频率稳定的飞行级光学参考腔。载于IEEE国际频率控制与欧洲频率和时间论坛联合会议（FCS）论文集。IEEE。doi:2011.5977873 10.1109/fcs.。

Todd, B., & Uznanski, S.（2015）。电子系统中的辐射风险及其缓解。doi: 10.5170/CERN-2015-003.245。Van Allen, J. A.（1959）。地球周围的辐射带。《科学美国人》，200(3)，39–47。URL: http://www.jstor.org/stable/24944942。Wahr, J., Molenaar, M., & Bryan, F.（1998）。地球重力场的时间变化：水文和海洋效应及其利用GRACE进行探测的可能性。《地球物理研究杂志：固体地球》，103(B12)，30205–30229。doi:10.1029/98JB02844。Wahr, J., Swenson, S., Zlotnicki, V. 等（2004）。GRACE观测到的时变重力：首批结果。《地球物理研究快报》，*31* 11 10.1029/( )。doi: 。2004gl019779 Wand, V., Guzm´an, F., Heinzel, G. 等（2006）。LISA相位计的研制。载于《AIP会议论文集》。AIP。doi:10.1063/1.2405118。Ware, B., Folkner, W., Shaddock, D. 等（2006）。航天器间激光计量相位测量系统。《地球科学技术会议》，。Wen, H. Y., Kruizinga, G., Paik, M. 等（2019）。GRACE-FO一级数据产品用户手册。喷气推进实验室。URL: https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO_L1_Handbook.pdf 56935, JPL D-,

2019年9月11日版本。Zhang, Y., Guo, D., Guo, K. 等（2021）。某型标定卫星单粒子翻转效应分析及相关特性研究。载于 Z. Zhang（编），《2021年神经网络、信息与通信工程国际会议》。SPIE。doi:10.1117/12.2615276。