

# 重力卫星串联编队仿真分析

朱广彬<sup>1</sup>, 常晓涛<sup>1,2</sup>, 邹斌<sup>3</sup>, 曹华东<sup>1</sup>

(1. 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心, 北京 100048; 2. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 江苏省测绘工程院, 江苏 南京 210013)

**摘要:** 现有重力卫星任务存在时空分辨率不足、时空混频以及重力场信号各向异性等局限性. 分别对重力卫星串联编队的轨道高度、轨道倾角、星间距离等指标进行仿真分析, 就重力卫星串联编队星座模式对重力场时空分辨率的影响进行了数值分析. 结果表明, 卫星轨道高度的选择需要兼顾重力场信号衰减和卫星寿命等因素, 以维持在 300~400 km 为优; 轨道倾角选择应充分考虑极空白问题的影响, 极空白区大小不宜超过 6°; 星间距离大于 250 km 时, 重力场精度的提升并不明显, 重力卫星串联编队星间距离设为 50~100 km 为优. 重力卫星串联编队星座模式可同时有效提升地球重力场时空分辨率, 实现时变重力场的各向同性探测.

**关键词:** 重力卫星; 地球重力场; 串联编队; 卫星星座; 时空分辨率

中图分类号: P223

文献标志码: A

of gravity field and the life of the satellite, the satellite formation orbit altitude is better at 300~400 km. The choice of the orbit inclination should consider the influence of the polar gaps sufficiently, and the gap size should not exceed 6°. Also, when the inter-satellite range is greater than 250 km, the improvement of the gravity field accuracy is not obvious, and the inter-satellite range is excellently set to 50~100 km. Besides, the constellation including two GRACE-type gravity satellite formation can effectively enhance the spatial and temporal resolution of the earth's gravity field at the same time to achieve isotropic exploring of the time-variable gravity field.

**Key words:** gravity satellite; earth gravity field; GRACE-type satellite formation; satellite constellation; spatial and temporal resolution

## Simulation Analysis of GRACE-type Gravity Satellite Formation

ZHU Guangbin<sup>1</sup>, CHANG Xiaotao<sup>1,2</sup>, ZOU Bin<sup>3</sup>, CAO Huadong<sup>1</sup>

(1. Satellite Surveying and Mapping Application Center, NASG, Beijing 100048, China; 2. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Jiangsu Province Surveying and Mapping Engineering Institute, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** The gravity satellite missions launched have the limitations in insufficient spatial and temporal resolution, space-time aliasing, and anisotropy of the gravitational field signals. The orbit altitude, the orbit inclination and the inter-satellite range of GRACE-type gravity satellite formation were simulated and analyzed. The numerical analysis of the impact of two GRACE-type gravity satellite constellation on the spatial and temporal resolution of gravity field was carried out. The results show that, considering the signal attenuation

地球重力场反映了地球物质的空间分布、运动和变化, 与人类生产生活密切相关. 高精度的地球重力场信息作为重要的测绘地理信息之一, 是建立全球统一的高程基准、区域性测绘垂直基准的重要基础. 随着我国经济建设发展和“一带一路”战略、国家海洋战略的逐步实施, 全球高程基准统一、水资源监测、海平面上升与全球气候变化等对高精度高分辨率地球重力场信息的获取提出了更高要求.

随着星载全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)精密定轨技术的不断发展, CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload)、GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 和 GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) 卫星重力观测任务相继成功实施, 地球重力场的信息量及探测精度均有了较大幅度的改善, 静态重力场的中长波探测精度有了 2~3 个量级的提高, 地球重力场中长波信

收稿日期: 2017-12-22

基金项目: 民用航天预先研究项目(重力梯度测量卫星系统技术); 高分辨率对地观测系统重大专项

第一作者: 朱广彬(1981—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为卫星大地测量. E-mail: sasmac\_zgb@163.com

通信作者: 邹斌(1992—), 男, 工学硕士, 主要研究方向为空间大地测量. E-mail: binchow77tt@163.com

号的获取能力得以迅速提高<sup>[1-2]</sup>. 纯 GOCE 卫星重力场模型 GO\_TIM\_R5 在 100 km 空间分辨率(除极地外)上的全球大地水准面误差可达到 2.4 cm<sup>[3]</sup>. 但相关科学研究表明<sup>[4]</sup>, GNSS 水准测量要求大地水准面精度在 100~1 000 km 半波长上达到 1 cm, 建立统一的全球高程系统要求大地水准面精度在 100~20 000 km 半波长上达到 1 cm, 短尺度海洋环流特征的提取所依赖的大地水准面精度在 100 km 的半波长上达到 1~2 cm. 从总体上讲, 目前大地水准面的确定精度, 与满足相关科学领域的需求, 实现大地水准面精度 100 km 半波长上优于 1 cm 的大地测量总体目标尚存在一定差距. 进一步提高地球重力场中、长波分量的准确度, 同时尽可能获取更加海量的地球重力场观测信息, 成为大地测量领域下一步需要重点解决的科学问题.

目前, CHAMP、GRACE 和 GOCE 卫星均已完成其重力场探测的使命, GRACE 后续卫星 GRACE-FO 也于 2018 年 5 月发射, 发展我国重力测量卫星任务已提上日程. 对于稳态重力场而言, 当前重力卫星任务的局限性主要体现在无法实质性地降低卫星飞行轨道高度以及提高加速度计和其他关键载荷的测量精度. 对于时变重力场, 目前主要依赖于 GRACE 卫星任务实现, 其主要缺点在于观测模式和时空分辨率的限制造成南北条带误差和时空频率的混叠<sup>[5-7]</sup>. 为此, 文献<sup>[8-12]</sup>研究采用重力卫星编队模式以克服现有重力卫星任务存在的局限性, 包括车轮编队、钟摆编队等模式. 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在继续发展 GRACE 后续重力卫星任务的同时, 从经费预算、轨道控制以及载荷精度水平等多方面考虑, 提出了下一代卫星重力任务 NGGM-D, 该任务采用串联编队星座模式, 即 2 对 4 颗 GRACE 卫星处于扭曲轨道, 以提高时空分辨率, 减少南北条带误差, 预计于 2025 年发射<sup>[13-14]</sup>.

以下一代重力卫星串联编队星座为研究对象, 在分析现有重力探测任务局限性的基础上, 对重力卫星串联编队的轨道参数等进行优选设计, 就重力卫星串联编队星座的重力场反演精度进行对比分析.

## 1 现有重力探测任务的局限性

由于探测模式和载荷精度的限制, 当前的重力

卫星任务主要存在以下几个不足<sup>[15-16]</sup>:

(1) 重力场模型的时空分辨率不足问题<sup>[2-3]</sup>. 为了获取高精度的地球重力场信息, GRACE 和 GOCE 重力卫星的轨道高度分别设置在 500 km 和 250 km 的高度水平上, 在观测模式固定、载荷精度水平有限的情况下, 空间分辨率和时间分辨率呈现此消彼长的过程. 目前的卫星重力场信息尚无法达到大地水准面 100 km 分辨率 1 cm 精度的目标<sup>[3]</sup>.

(2) 时变重力场的混频问题. 地球时变重力场反映了地球非稳态的质量重新分布. 为提取地球陆地水、冰川等质量变化信息, 在 GRACE 时变重力场模型的解算中, 利用各种潮汐模型扣除了潮汐影响, 非潮汐的大气和海洋影响也在数据处理过程中扣除. 由于各种潮汐模型的不精确以及观测数据的采样率不足等原因, GRACE 时变重力场模型不可避免会混入潮汐模型误差, 产生混频问题. 例如, GRACE 时变重力场  $J_2$  项中存在周期为 161 d 的如潮模型误差, 与太阳半日分潮  $S_2$  项的周期一致<sup>[17]</sup>.

(3) 时变重力场的各向异性问题. GRACE 卫星采用近极圆轨道和低-低卫星跟踪卫星观测模式, 星间距离变率观测值是获取时变重力场的主要观测值, 卫星运行轨道特点导致了卫星对南北方向的重力场变化信息更为敏感, 由此产生了南北向的条带误差.

为解决现有重力卫星任务的局限性, 一方面, 可采用新的卫星载荷并就观测载荷的精度进行提升, 例如 GRACE-FO 卫星采用了星间激光干涉测距系统, 由此可提升低-低卫星跟踪卫星观测精度水平; 另一方面, 需要在重力卫星的轨道设计、观测模式和观测理念上进行创新, 例如发展重力卫星编队模式, 组建卫星星座等.

重力卫星编队主要包括以下几种模式<sup>[8-11]</sup>:

(1) 串联编队. 串联编队是环绕卫星和参考卫星按照一定的前后顺序在同一轨道上运行的编队构型. 该卫星编队只获得沿轨方向的观测值, 构型简单, 轨道控制较为容易. 相对运动方程为

$$x(t) = \rho_0 \quad (1)$$

式中:  $\rho_0$  为环绕卫星在相对运动坐标系<sup>[11]</sup>  $Oxyz$  中的沿轨方向相对位置矢量;  $x(t)$  为沿轨距离观测值.

(2) 钟摆编队. 钟摆编队的 2 颗卫星运行在不同的轨道平面上. 两星相对运动发生在一个平面的 2 个方向上, 在沿轨方向上为直线运动, 沿法线方向上是简谐运动. 相对运动方程为

$$\begin{cases} x(t) = \rho_{01} \\ y(t) = \rho_{02} \cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\rho_{01}$ 、 $\rho_{02}$ 为环绕卫星在相对运动坐标系<sup>[11]</sup> $Oxyz$ 中的沿轨、法向相对位置矢量; $n$ 为轨道平均角速度。

(3) 车轮编队. 车轮编队可分为径向车轮编队和倾斜车轮编队. 其中, 径向车轮编队是环绕卫星和参考卫星运行在同一轨道平面上的编队构型, 可提供沿轨和径向方向的卫星观测量, 相对运动方程为

$$\left(\frac{x}{2\rho_0}\right)^2 + \left(\frac{z}{\rho_0}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

倾斜车轮编队中, 环绕卫星和参考卫星的相对运动是在空间中的, 可同时提供沿轨、法向和径向方向的卫星观测量, 相对运动方程为

$$\begin{cases} \left(\frac{x}{2\rho_0}\right)^2 + \left(\frac{z}{\rho_0}\right)^2 = 1 \\ y(t) = -\frac{\sqrt{3}}{2}\rho_0\cos(nt) \end{cases} \quad (4)$$

(4) 串联-钟摆编队. 串联-钟摆编队是综合串联编队和钟摆编队形成的一种模式, 相对运动方程也与二者相同, 可同时得到沿轨和法向 2 个方向的卫星观测量, 是一种相对复杂但较易实现的编队方法。

相对于其他编队模式, 从轨道控制和发射成本等多方面考虑, 串联编队模式具有更强的可实施性. 以此为研究对象, 就其轨道特征和串联编队卫星星座对重力场的影响进行分析。

## 2 重力卫星串联编队仿真分析

以重力卫星串联编队为研究对象, 仿真分析不同的卫星轨道高度、轨道倾角、星间距离对地球重力场反演精度的影响<sup>[18-19]</sup>. 在仿真过程中, 选择参考重力场模型 EGM2008, 模拟了 30 d 的卫星轨道. 轨道误差和星间距离变率误差参考 GRACE 卫星的测量精度分别设为 3 cm 和  $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 这里未考虑非保守力的影响。

### 2.1 卫星轨道高度的选择

地球重力场信息随着卫星轨道高度的升高呈  $[R_e/(R_e+H)]^{l+1}$  (其中  $R_e$  为地球平均半径;  $H$  为轨道高度;  $l$  为重力场模型阶数) 指数衰减, 长波信号衰减幅度较小, 中波信号衰减幅度次之, 短波信号衰减幅度最大<sup>[17-18]</sup>. 而轨道高度太低, 卫星所受到的大气阻力会急剧增加 (如表 1 所示), 使得加速度计噪声增大, 轨道维持更加困难, 卫星寿命相应缩短. 因此, 合理选择卫星轨道高度非常关键. 图 1 为轨道倾角为  $89^\circ$ 、星间距离为 100 km 时不同卫星轨道高度恢复的地球重力场模型系数阶误差. 从图 1 中可以

看出, 在 20 阶以下, 各轨道高度解算的重力场模型阶误差相差并不大, 均小于  $4 \times 10^{-11}$ , 说明地球重力场长波信号受卫星轨道高度变化影响较小, 而在 20 阶以后, 当卫星轨道高度大于 300 km 时, 地球重力场的精度呈降低趋势. 当卫星轨道高度大于 400 km 时, 地球重力场的精度发散较快, 60 阶的模型阶误差从 425 km 时的  $2 \times 10^{-9}$  增大到了 480 km 时的  $7 \times 10^{-9}$ . 这说明串联编队卫星轨道高度以保持在 300~400 km 左右为佳。

表 1 不同轨道高度对应的大气密度与阻力

Tab.1 Relationship between the orbital altitude and the atmospheric density and drag

轨道高度/km	大气密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	大气阻力/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
200	$3.61 \times 10^{-10}$	$3.507 \times 10^{-5}$
300	$3.34 \times 10^{-11}$	$3.245 \times 10^{-6}$
400	$5.09 \times 10^{-12}$	$4.946 \times 10^{-7}$
500	$1.17 \times 10^{-12}$	$1.137 \times 10^{-7}$

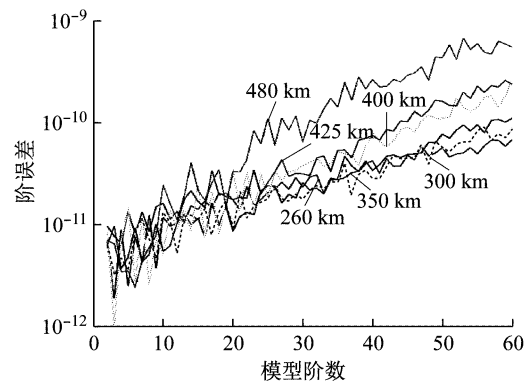


图 1 不同轨道高度时解算的重力场模型阶误差  
Fig.1 Model degree errors of gravity field with different orbit altitudes

### 2.2 卫星轨道倾角的选择

重力卫星轨道一般采用近极圆轨道, 轨道倾角的大小导致在两极地区存在不同的重力卫星观测空白区, 也就是所谓的极空白问题. 极空白问题会导致重力场模型低阶次的球谐系数估计精度较低<sup>[18-19]</sup>. 图 2 给出了轨道高度为 350 km、星间距离为 100 km 时不同轨道倾角解算的重力场模型阶误差, 图 3 给出了轨道倾角分别为  $81^\circ$  和  $89^\circ$  时的极区大地水准面误差。

如图 2 中所示, 轨道倾角为  $81^\circ$  时, 重力场模型在 40 阶以下的阶误差接近于  $10^{-10}$ , 明显高于其他轨道倾角, 轨道倾角为  $89^\circ$  时则相对最优. 轨道倾角较大时, 两极大地水准面精度明显降低. 轨道倾角为  $81^\circ$  时, 极区大地水准面误差超过了 10 cm. 为减弱极空白问题的影响, 轨道倾角尽量选择近极轨道倾角,

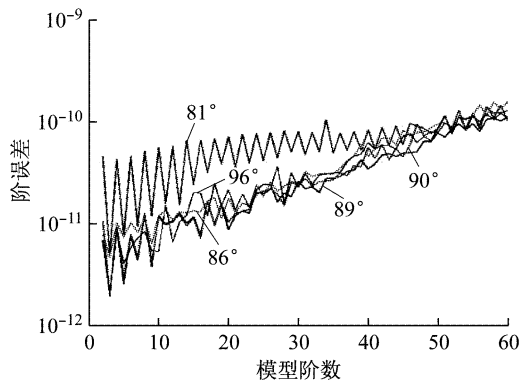


图 2 不同轨道倾角时解算的重力场模型阶误差  
Fig. 2 Model degree errors of gravity field with different orbit inclinations

极空白区大小不宜超过  $6^\circ$ 。

### 2.3 星间距离的选择

低-低卫星跟踪卫星观测系统的性能主要依赖于星间距离函数  $1/(1-P_n(\cos \theta))$  (其中  $P_n(\cos \theta)$  为勒让德函数;  $\theta$  为卫星地心夹角), 权值越小, 表明恢复的重力场精度越高。在低阶项, 卫星间距越大, 权函数值越小, 而在高阶项, 随着卫星间距的增大, 权函数值反而可能变大, 具有波动性变化的特征。图 4 给出了轨道高度设为 350 km、轨道倾角为  $89^\circ$  时, 不同星间距离的重力场模型阶误差。

从图 4 中可以发现, 当星间距离从 250 km 提升到 300 km 时, 其对重力场精度的提升并不明显, 二

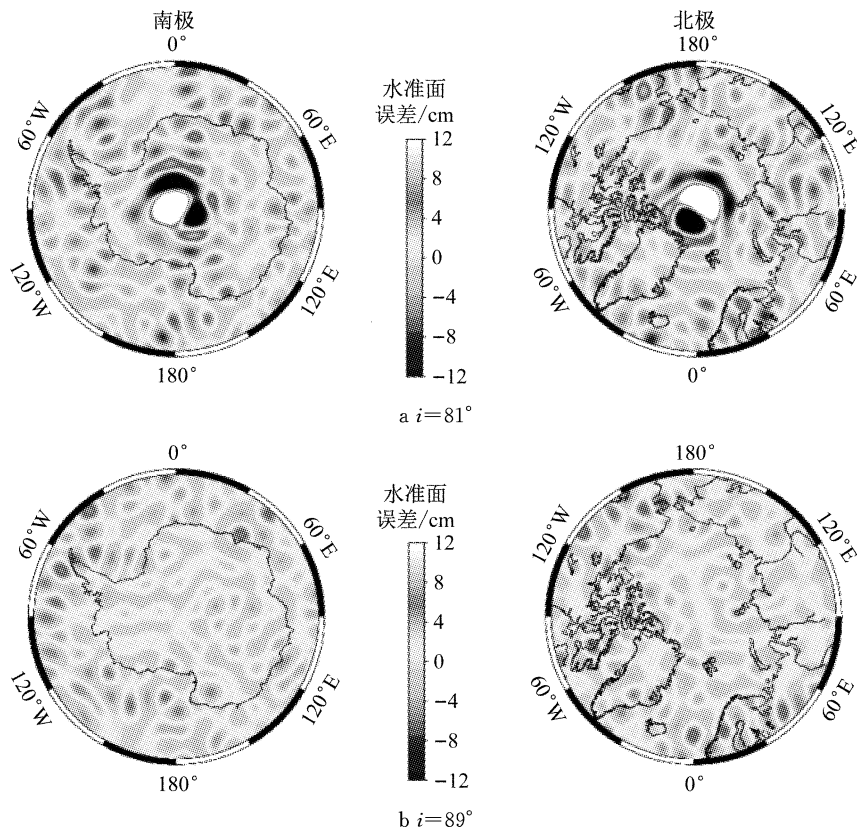


图 3 轨道倾角为  $81^\circ$  和  $89^\circ$  时的极区大地水准面误差  
Fig. 3 Polar geoid errors with the inclination of  $81^\circ$  and  $89^\circ$

者阶误差均可达到  $10^{-12}$  水平, 因此星间距离设定为 250 km 为佳。但考虑到低-低卫星跟踪卫星模式下卫星只能感应空间尺度不小于星间距离的重力场结构, 小于星间距离的重力场信息基本失真。为获取高精度的地球中短波重力场信息, 特别是获取优于 100 km 空间分辨率的地球重力场信息, 将低-低卫星跟踪的星间距离设为 50~100 km 为优。

### 2.4 串联编队卫星星座反演重力场

为了获取更高精度和分辨率的地球重力场信

息, 可将卫星编队构型进行组合, 组成卫星星座。就串联编队卫星星座对地球重力场的影响进行简要分析。将轨道高度和轨道倾角分别设为 350 km 和  $89^\circ$ , 星间距离设为 100 km, 基于以下 4 种方案反演得到了 60 阶的地球重力场模型: 方案 1, 仿真 15 d 的 GRACE 串联编队观测数据; 方案 2, 仿真 30 d 的 GRACE 串联编队观测数据; 方案 3, 仿真 15 d 的串联编队卫星星座观测数据, 其中 2 组卫星平近点角  $M$  不同; 方案 4, 仿真 15 d 串联编队卫星星座观测数

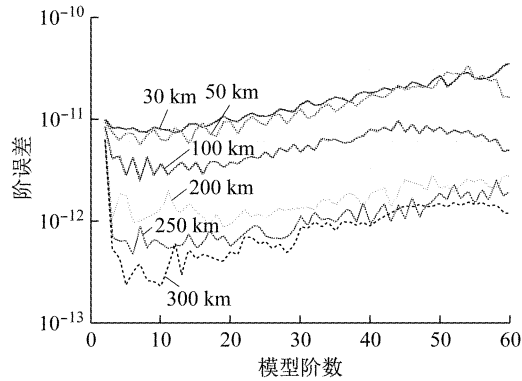


图 4 不同空间距离解算的重力场模型阶误差  
 Fig. 4 Model degree errors of gravity field with different distances of satellite pair

据,其中 2 组卫星升交点赤经  $\Omega$  不同。

方案 3 是 4 颗卫星在同一轨道面内,在相同时间内其时间分辨率是方案 1 的 2 倍,星下点轨迹数量也是方案 1 的 2 倍,而方案 4 是 4 颗星两两共面,其空间分辨率是方案 1 的 2 倍,时间分辨率与方案 1 相同。

图 5 和图 6 分别给出了不同仿真方案得到的模型阶误差分布和模型系数误差谱图. 图 6 中 C、S 分别为重力场模型球谐系数的  $C_{km}$  和  $S_{km}$  部分,  $k$  和  $m$

分别为球谐系数的阶和次;  $\delta C$  和  $\delta S$  为重力场模型系数误差. 从图中可以发现,串联编队卫星星座反演的模型系数,特别是 20 阶以上的扇谐系数精度以及模型阶误差明显优于 GRACE 串联编队模式,模型阶误差由 60 阶时的  $6 \times 10^{-11}$  提高到了  $3 \times 10^{-11}$ ,这说明通过卫星星座模式提升时间分辨率和空间分辨率的方式是有效的,可显著提高地球重力场的探测精度。

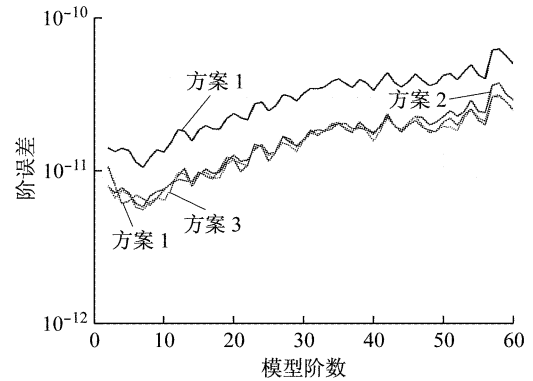
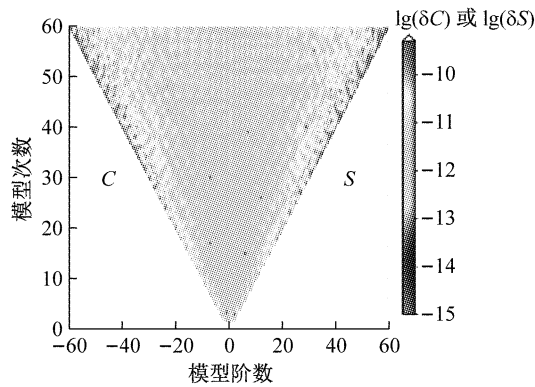
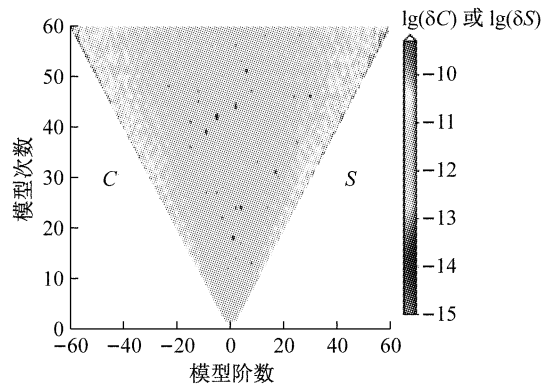


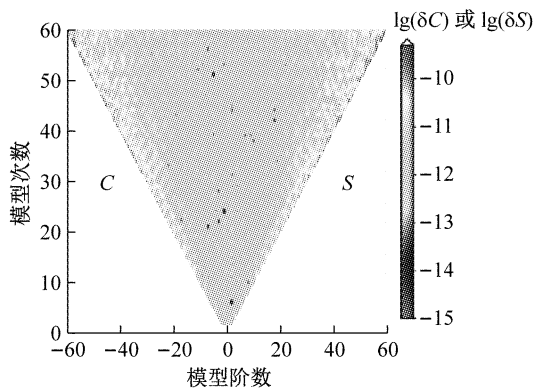
图 5 不同仿真方案得到的重力场模型阶误差  
 Fig. 5 Model degree errors of gravity field with different simulation schemes



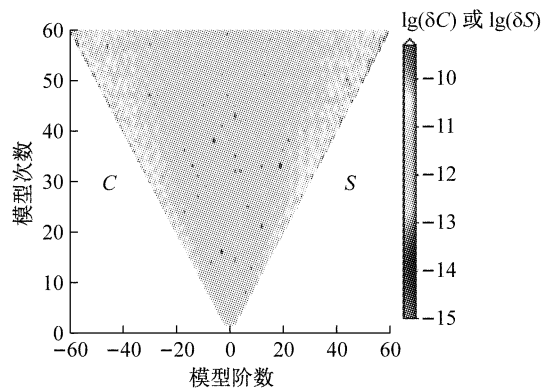
a 方案 1



b 方案 2



c 方案 3



d 方案 4

图 6 不同仿真方案得到的重力场模型系数误差谱

Fig. 6 Coefficient error spectra of gravity field model with different simulation schemes

图 7 给出了不同仿真方案得到的大地水准面误差( $\delta N$ )分布,表 2 给出了大地水准面的误差精度统计.从中可以看出,对于 GRACE-type 卫星编队的 2 颗卫星,用 30 d 的卫星观测数据(方案 2)解算的地球重力场模型精度明显高于用 15 d 的卫星观测数据(方案 1)解算的地球重力场模型精度,而用 15 d 的不同升交点角卫星星座(方案 3)和 15 d 的不同升交点赤经卫星星座(方案 4)解算的重力场模型精度相当,大地水准面精度明显优于 GRACE 编队模式.这说明空间采样对重力场的反演精度有着至关重要的作

用.此外,采用 15 d 的卫星星座观测数据获取的大地水准面精度要略优于 30 d GRACE 串联编队卫星得到的大地水准面精度.由此可知重力卫星串联编队星座模式可有效提升地球重力场的时间分辨率和空间分辨率,并可有效改善时变重力场的各向异性问题.利用重力卫星串联编队组成卫星星座,进行地球重力场的反演,可在较短的任务时间内获得高精度的重力场解算结果,实现地球重力场时空分辨率的同时提升,这对于陆地水储量等时变重力场应用研究具有重要意义.

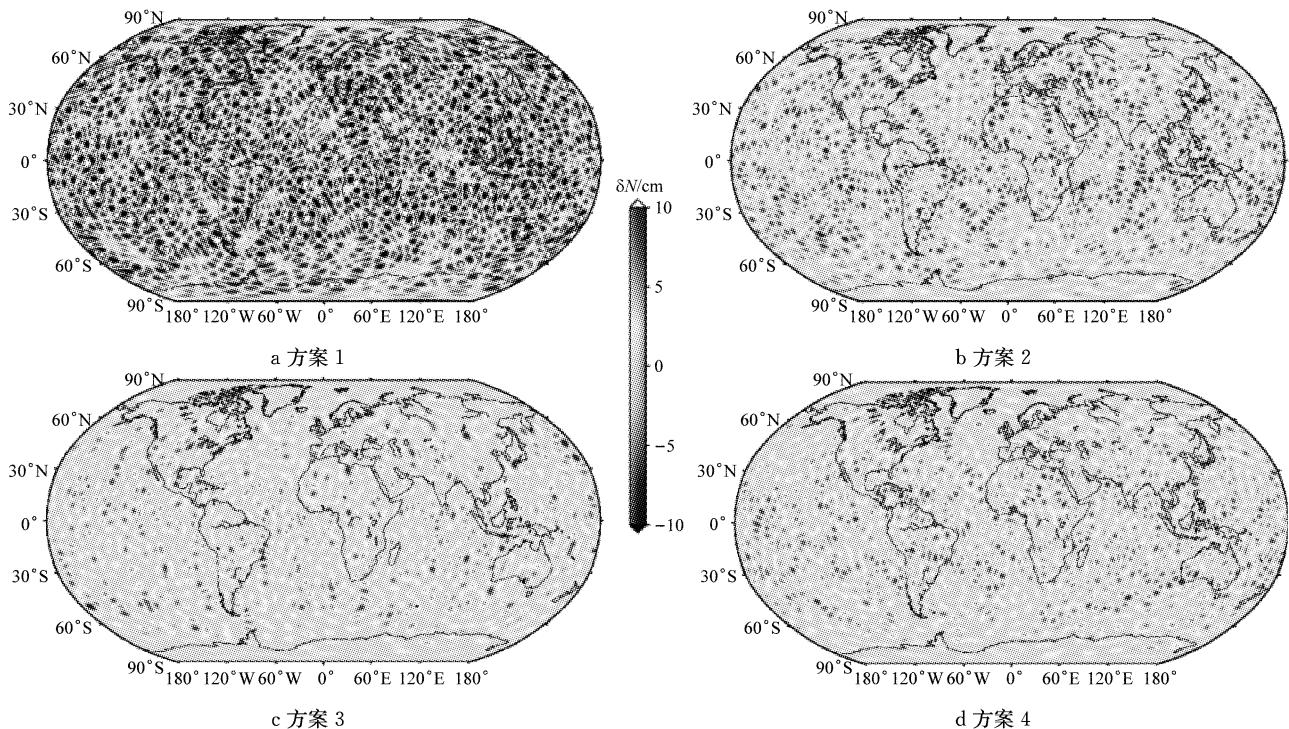


图 7 不同仿真方案得到的大地水准面误差

Fig.7 Geoid errors of different simulation schemes

表 2 不同仿真方案的大地水准面精度统计

Tab.2 Geoid accuracy statistics of different simulation schemes

方案	最大值	最小值	均值	标准差
方案 1	37.97	-24.48	0.003 2	1.27
方案 2	20.79	-13.74	0.003 9	0.70
方案 3	18.90	-12.15	0.004 1	0.63
方案 4	19.03	-12.31	0.004 9	0.64

### 3 讨论与结论

现有重力卫星任务存在时空分辨率不足、时空混频以及重力场信号各向异性等局限性.利用仿真数据对重力卫星串联编队的轨道高度、轨道倾角、星间距离等指标进行了数值分析,就重力卫星串联编队星座模式对重力场时空分辨率的影响进行了分

析,结果表明:

(1) 地球重力场信号随卫星轨道高度降低而逐渐增强,但轨道高度降低引起大气阻力增加,造成加速度计载荷噪声增大,卫星寿命缩短.数值分析表明,重力卫星串联编队的轨道高度维持在 300~400 km 为佳.非极轨道带来的极空白问题,会引起低次项球谐系数的估计精度较差,为减小这种影响,卫星轨道倾角应尽量选择近极轨道倾角,极空白区大小不宜超过  $6^\circ$ .

(2) 星间距离增大有利于提高重力场长波信号的恢复精度,但当星间距离大于 250 km 时,重力场精度的提升并不明显.考虑到低-低卫星跟踪卫星模式下卫星只能感应空间尺度不小于星间距离的重力场结构,为获取优于 100 km 空间分辨率的地球重力

场信息,低-低卫星跟踪的星间距离设为50~100 km为优。

(3) 重力卫星串联编队星座可在较短的任务时间内获得高精度的重力场解算结果,实现地球重力场时空分辨率的同时提升、改善时变重力场的各向异性问题,这对于时变重力场在陆地水储量、冰川变化、海平面上升等地表质量变化领域的应用具有重要价值。在串联编队星座的应用能力分析方面,后续将进行进一步的研究分析。

重力卫星可实现全球重力场信息的高效获取,特别对于地球重力场中、长波特征的精化具有重要作用。我国重力卫星任务的发展已提上日程,为提升重力场探测的精度水平,在加大超精超静超稳平台、重力梯度仪、无拖曳控制、毫牛级推进等技术攻关的同时,需要在卫星探测模式上进行创新和尝试,实现地球重力场更高精度和更高分辨率的探测,为地学研究和应用服务。

#### 参考文献:

- [1] 钟波. 基于 GOCE 卫星重力测量技术确定地球重力场的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.  
ZHONG Bo. Study on determination of the earth's gravity field from satellite gravimetry mission GOCE[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [2] FLECHTNER F. Observation of the system earth from space: CHAMP, GRACE, GOCE and future missions[M]. New York: Springer-Verlag, 2014.
- [3] BROCKMANN J M, ZEHENTNER N, HÖCK E, *et al.* EGM\_TIM\_RL05: An independent geoid with centimeter accuracy purely based on the GOCE mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(22): 8089.
- [4] READINGS C J, REYNOLDS M L. Gravity field and steady-state ocean circulation mission [C]// ESA Publications Division. Noordwijk: ESA, 1999: 1-217.
- [5] WIESE D N, VISSER P, NEREM R S. Estimating low resolution gravity fields at short time intervals to reduce temporal aliasing errors[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 48(6):1094.
- [6] VISSER P, SNEEUW N, REUBELT T, *et al.* Space-borne gravimetric satellite constellations and ocean tides: aliasing effects[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181(2):789.
- [7] 赵倩, 姜卫平, 徐新禹, 等. 卫星编队用于消除海潮模型混频误差影响的可行性研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(2):169.  
ZHAO Qian, JIANG Weiping, XU Xinyu, *et al.* Feasibility study on application of satellite formations for eliminating the influence from aliasing error of ocean tide model[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 45(2):169.
- [8] WIESE D N, FOLKNER W M, NEREM R S. Alternative mission architectures for a gravity recovery satellite mission [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(6):569.
- [9] BENDER P L, WIESE D N, NEREM R S. A possible dual-GRACE mission with 90 degree and 63 degree inclination orbits [C]// *Proceedings of the 3rd International Symposium on Formation Flying, Missions and Technologies*. Noordwijk: ESA, 2008: 1-6.
- [10] 姜卫平, 赵伟, 赵倩, 等. 新一代探测地球重力场的卫星编队[J]. *测绘学报*, 2013, 43(2):111.  
JIANG Weiping, ZHAO Wei, ZHAO Qian, *et al.* Satellite formation for a new gravity field exploration mission[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(2):111.
- [11] 赵倩. 利用卫星编队探测地球重力场的方法研究与仿真分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.  
ZHAO Qian. Methodology research and simulation analysis of the earth's gravity field determination using satellite formation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [12] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 基于下一代四星转轮式编队系统精确和快速反演 FSCF 地球重力场[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(9):2928.  
ZHENG Wei, XU Houze, ZHONG Min, *et al.* Precise and rapid recovery of the Earth's gravitational field by the next-generation four-satellite cartwheel formation system [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(9): 2928.
- [13] SILVESTREIN P, AGUIRRE M, MASSOTTI L, *et al.* The future of the satellite gravimetry after the GOCE mission[M]. Berlin: Geodesy for Planet Earth, 2012.
- [14] PANET I, FLURY J, BIANCALE R, *et al.* Earth system mass transport mission (e. motion): A concept for future earth gravity field measurements from space [J]. *Surveys in Geophysics*, 2013, 34(2):141.
- [15] ZHENG W, XU H Z, ZHONG M, *et al.* Accurate and rapid error estimation on global gravitational field from current GRACE and future GRACE follow-on missions [J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(8):3597.
- [16] 冉将军, 许厚泽, 沈云中, 等. 新一代 GRACE 重力卫星反演地球重力场的预期精度 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(9):2898.  
RAN Jiangjun, XU Houze, SHEN Yunzhong, *et al.* Expected accuracy of the global gravity field for next GRACE satellite gravity mission [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(9): 2898.
- [17] 朱广彬, 李建成, 文汉江, 等. GRACE 与 SLR  $J_2$  项时间序列的小波分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2009, 29(4):140.  
ZHU Guangbin, LI Jiancheng, WEN Hanjiang, *et al.* Wavelet analysis of  $J_2$  time series of GRACE and SLR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(4):140.
- [18] ELSAKA B. Simulated satellite formation flights for detecting the temporal variations of the Earth's gravity field[D]. Bonn: University of Bonn, 2010.
- [19] WIESE D N, NEREM R S, LEMOINE F G. Design considerations for a dedicated gravity recovery satellite mission consisting of two pairs of satellites [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(2):81.