

基于频率优化组合的 KBR 系统时标误差校正*

陈 莉, 王跃科, 张传胜

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 时标误差是 K 波段精密测距仪(KBR)的一个重要测距误差源, 现有的时标误差校正方法依赖于对星间时标偏差的精确测量。针对目前我国星间时标偏差测量精度不能满足校正需求的问题, 提出了基于双频优化组合的时标误差校正方法, 推导了优化频率之间应该满足的定量关系。研究了双频优化组合的实现, 指出原有的 KBR 系统无法实现频率优化, 在此基础上设计实现了一种改进频率流程的 KBR 系统, 并对新的时标误差校正方法进行了实验验证。实验结果表明, 基于双频优化组合的时标误差校正方法和改进的 KBR 系统有效降低了对星间时标偏差测量精度的要求。

关键词: K 波段精密测距仪; 时标误差; 频率优化组合; 频率流程改进

中图分类号: TN98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)02-0159-05

A novel time-tag error correction method for KBR system based on combination of optimal frequencies

CHEN Li, WANG Yueke, ZHANG Chuansheng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Time-tag error is an important error source of K-band ranging (KBR) system, and the present methods for time-tag error correction are dependent upon accurate measurement of inter-satellite time-tag offset. Aiming at the problem that currently the national measurement accuracy of inter-satellite time-tag offset cannot satisfy the demand for time-tag error correction, a novel correction method based on the combination of two optimal frequencies is proposed, and the quantity relation of the optimal frequencies is deduced. Research on the realization for combination of two optimal frequencies, which shows that it is unrealizable utilizing the existing KBR system, was performed. Consequently, a new KBR system adopting an advanced frequency flow was designed and realized. The experimental results demonstrate that the proposed method and the advanced KBR system effectively reduce the requirement for measurement accuracy of inter-satellite time-tag offset.

Key words: K-band ranging system; time-tag error; combination of optimal frequencies; advanced frequency flow

低轨卫星跟踪低轨卫星 (Low-Low mode Satellite-to-Satellite Tracking, SST-LL) 是一种重要的地球重力场测量模式, 它通过测量两颗低轨卫星之间的距离和距离变化率来反演地球重力场模型^[1]。GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) 系统是 SST-LL 技术的一个典型应用, 它由德美合作研制并于 2002 年 3 月发射, 首次实现了全球覆盖的 SST-LL 模式, 使得人们对于地球重力场模型的认识水平达到了前所未有的高度^[2]。GRACE 的成功很大程度上得益于它的一个主要有效载荷——K 波段精密测距仪 (K-Band Ranging, KBR), 其对星间距离的测量精度优于 10 μm , 对星间距离变化率的测量精度优于 1 $\mu\text{m}/\text{s}$ ^[3]。

KBR 的观测数据涉及多个误差源, 要得到高

精度的测距结果, 必须对主要的误差项进行有效的校正, 其中一个关键需求是对时标误差的校正^[4]。时标误差是指由于双星的时标之间存在偏差所导致的测距误差, 现有的时标误差校正方法是首先测得星间时标偏差, 再通过对测距观测数据进行延时滤波来修正该时标偏差。因此, 时标误差校正效果与星间时标偏差的测量精度关系密切, 例如, 要达到微米级精度的星间距离测量, GRACE 系统要求时标偏差测量误差小于 150ps^[5]。为满足这一需求, GRACE 系统携带高性能 GPS 接收机, 利用双频载波相位观测值结合 IGS (International GPS Service) 的精密星历, 经过事后处理得到了 100ps 精度的星间时标偏差测量^[6]。我国也在致力于 KBR 载荷系统的研究, 但目前尚处于预先研究阶段^[7-9]。由于我国得不到

* 收稿日期: 2012-08-31

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 陈莉(1983—), 男, 湖南双峰人, 博士研究生, E-mail: cl_216209@163.com;

王跃科(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: wangyueke@263.net

P(Y)码的支持,无法获取高精度的 GPS 双频载波相位观测值,同时我国在建的北斗二代导航系统还只能提供亚太区域的导航授时服务,导致在 KBR 时标误差校正问题上,不能获得像 GRACE 系统那样精确的时标偏差测量值,无法采用现有的时标误差校正方法。因此,在我国现有技术条件下,研究不依赖于星间时标偏差精确测量的时标误差校正方法成为自主研发 KBR 系统的一个迫切需求。针对这一需求,本文根据 KBR 系统时标误差与载波频率之间的关系,提出了一种基于频率优化组合的时标误差校正方法,并讨论了校正方法的工程实现。

1 KBR 系统时标误差模型

KBR 采用双向单程载波测距 (Dual One-Way Ranging, DOWR) 技术,其测量原理为^[10]:卫星 1 和卫星 2 分别向对方发射 K/Ka 频段单载波信号,每颗卫星记录接收信号相对于本地发射信号的相位变化,并按照一定的采样频率(如 GRACE 为 10Sa/s)同时采集该相位值传输到地面,地面将两颗卫星的单程相位观测值求和并做相应的误差校正处理后便可得到双向单程距离测量值。图 1 为 DOWR 系统测量原理示意图。

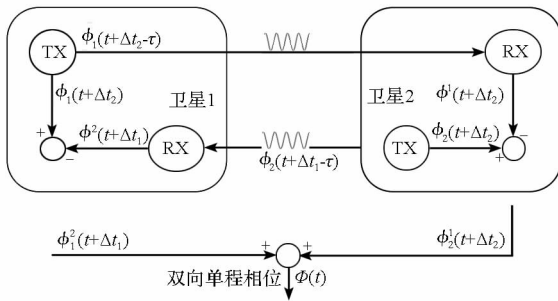


图 1 DOWR 系统测量原理
Fig. 1 The principle of DOWR

如图 1 所示,卫星 i 在理想采样时刻 t 时的单程相位观测值(单位为:周)可以表示为

$$\phi_i^j(t + \Delta t_i) = \phi_i(t + \Delta t_i) - \phi^j(t + \Delta t_i) + N_i^j + I_i^j + \varepsilon_i^j \quad i, j = 1, 2, i \neq j, (1)$$

其中, Δt_i 是卫星 i 实际采样时刻和理想采样时刻之间的偏差(称为时标偏差), $\phi_i(t + \Delta t_i)$ 和 $\phi^j(t + \Delta t_i)$ 分别是带有时标偏差 Δt_i 的参考相位和接收相位, N_i^j 是载波相位的整周模糊, I_i^j 是电离层相位延迟, ε_i^j 是系统测量噪声。假设星间天线相位中心的距离延迟为 τ (忽略双向链路的不一致性),则接收相位可以用发送时的相位来替代,式(1)可以重写为

$$\phi_i^j(t + \Delta t_i) = \phi_i(t + \Delta t_i) - \phi_j(t + \Delta t_i - \tau)$$

$$+ N_i^j + I_i^j + \varepsilon_i^j \quad i, j = 1, 2, i \neq j (2)$$

双向单程相位观测值定义为双星获取的两个单程相位之和,即

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= \phi_1^2(t + \Delta t_1) + \phi_2^1(t + \Delta t_2) \\ &= \phi_1(t + \Delta t_1) - \phi_2(t + \Delta t_1 - \tau) \\ &\quad + \phi_2(t + \Delta t_2) - \phi_1(t + \Delta t_2 - \tau) + N + I + \varepsilon \end{aligned} (3)$$

式(3)中每个相位又可以被分解为参考相位 $\phi_i(t)$ 、标称频率 f_i 相对于时间 t 的累积以及该时刻由频率源相位噪声引起的相位误差 $\delta\phi_i$ 之和,因此,经整理后式(3)可以写为

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= (f_1 + f_2)\tau + (f_1 - f_2)(\Delta t_1 - \Delta t_2) \\ &\quad + \{ [\delta\phi_1(t + \Delta t_1) - \delta\phi_1(t + \Delta t_2 - \tau)] \\ &\quad + [\delta\phi_2(t + \Delta t_2) - \delta\phi_2(t + \Delta t_1 - \tau)] \} \\ &\quad + N + I + \varepsilon \end{aligned} (4)$$

式(4)中第一项为期望得到的距离延迟;第二项为时标偏差引起的相位误差;第三项为频率源相位噪声引起的相位误差;其他则包括整周模糊、电离层效应和系统测量噪声等误差项。

定义 $\lambda = c/(f_1 + f_2)$, c 为光速,则由式(4)可得双向单程星间距离(含整周模糊)为

$$\rho(t) = \lambda \cdot \Phi(t) (5)$$

比较式(5)和式(4)可知,根据式(5)得到的测距值中存在多个误差项,其中时标误差即为式(4)中第二项转化的测距误差。因此,KBR 系统的时标误差可以建模为

$$\Delta\rho = c \cdot (f_1 - f_2) \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_2) / (f_1 + f_2) (6)$$

由式(6)可知,如果双星发射的载波频率偏差越小,则时标误差越小,然而双星的载波频率必须保证一定的偏差,才能满足 KBR 系统收发频率之间所需的隔离度。同时,导致测距误差的不是单颗卫星的时标偏差 Δt_i ,而是星间时标偏差,也即双星时标偏差之间的差异 $\Delta t = \Delta t_1 - \Delta t_2$ 。如果星间时标偏差为 0,则时标误差也为 0,但由于双星之间由不同的频率源驱动,星间时标偏差将不可避免地会产生。如果精确测得星间时标偏差,则利用式(6)可以很简单地校正时标误差,然而对星间时标偏差的测量总是会引入一定的随机误差。假设星间时标偏差的测量误差为 $\sigma(\Delta t)$,则校正后时标误差的理论不确定度可以表示为

$$\sigma(\Delta\rho) = c \cdot (f_1 - f_2) \cdot \sigma(\Delta t) / (f_1 + f_2) (7)$$

根据式(7),假设 $\sigma(\Delta t) = 1\text{ns}$,按照 GRACE 系统的频率配置,校正后的时标误差将超过 $3\mu\text{m}$ 。正因如此,为了将时标误差控制在微米级以下,GRACE 系统才要求星间时标偏差的测量误差小于 150ps 。然而,我国的技术现状不能满足

这一需求,所以必须研究不依赖于星间时标偏差精确测量的时标误差校正方法。

2 基于频率优化的时标误差校正

GRACE 卫星运行在 300km ~ 500km 高度的轨道上,该轨道高度上电离层效应对星间测距的影响很严重。GRACE 的 KBR 系统利用电离层效应与信号频率之间的关系,采用 K 和 Ka 两个频段组合来消除电离层效应,其原理是^[10]

$$\rho = \frac{f_{K1} f_{K2} \rho_K - f_{Ka1} f_{Ka2} \rho_{Ka}}{f_{K1} f_{K2} - f_{Ka1} f_{Ka2}} \quad (8)$$

其中, f_{K1} 、 f_{K2} 、 f_{Ka1} 和 f_{Ka2} 分别为卫星 1 和卫星 2 在 K 频段和 Ka 频段的载波频率, ρ_K 和 ρ_{Ka} 分别为 KBR 系统相应频段的双向单程距离观测值。

式(6)表明, KBR 时标误差与载波频率之间也存在直接关系,且式(8)中 ρ_K 和 ρ_{Ka} 包含的时标误差由相同的星间时标偏差所致,因此,可结合双频组合去除电离层效应的方法来校正时标误差。

联合式(6)和式(8)可知,经过双频组合后距离观测值中的时标误差为

$$\Delta\rho = \frac{f_{K1} f_{K2} \Delta\rho_K - f_{Ka1} f_{Ka2} \Delta\rho_{Ka}}{f_{K1} f_{K2} - f_{Ka1} f_{Ka2}} \quad (9)$$

其中, $\Delta\rho_K$ 和 $\Delta\rho_{Ka}$ 分别为 KBR 系统相应频段的时标误差。如果适当选择双星两个频段的频率值,令式(9)的分子项为 0,则有 $\Delta\rho = 0$ 。也即要求

$$f_{K1} f_{K2} c(f_{K1} - f_{K2}) \Delta t / (f_{K1} + f_{K2}) = f_{Ka1} f_{Ka2} c(f_{Ka1} - f_{Ka2}) \Delta t / (f_{Ka1} + f_{Ka2}) \quad (10)$$

若确定了双星 K 频段的频率和卫星 1 的 Ka 频段频率,则可以由式(10)计算出卫星 2 的 Ka 频段频率。求解式(10)后可得,卫星 2 的 Ka 频段频率应与其他三个频率之间满足如下关系:

$$f_{Ka2} = [(f_{Ka1}^2 - A) + \sqrt{(f_{Ka1}^2 - A)^2 - 4Af_{Ka1}^2}] / (2f_{Ka1}) \quad (11)$$

其中去掉了不符合实际的负数解,且有

$$A = f_{K1} f_{K2} (f_{K1} - f_{K2}) / (f_{K1} + f_{K2}) \quad (12)$$

以上即为通过频率优化,利用校正电离层效应的双频组合距离观测值校正 KBR 时标误差的原理。通过上述分析可知,新的时标误差校正方法不依赖于对星间时标偏差的精确测量,只需保证每颗卫星对两个频段载波相位的采样时刻相同,而这是很容易实现的;如果频率值可以精确设置并且不发生变化,优化后的双频组合距离观测值中将不含时标误差。

3 KBR 频率优化的实现

以 GRACE 系统为例,讨论 KBR 频率的优化

设置。其实际频率值^[11]和经过优化设计后的频率值如表 1 所示。由表 1 可知,GRACE 系统在 K 频段的双星频差约为 503kHz,在 Ka 频段则约为 670kHz,而经过优化设计的频率值则要求 Ka 频段的双星频差为 373kHz,小于 K 频段的双星频差。从时标误差校正这个问题上考虑,GRACE 系统 KBR 的频率设置并非最优的,我国自主研发的 KBR 系统可以有所改进。因此,后续内容研究 KBR 频率优化的实现。

表 1 GRACE 系统的实际频率和优化设计的频率值
Tab.1 Actual and optimal frequency configuration of GRACE

卫星/频段	GRACE 系统频率	优化后的频率
SAT1/K	24.527232GHz	24.527232GHz
SAT2/K	24.527735GHz	24.527735GHz
SAT1/Ka	32.702976GHz	32.702976GHz
SAT2/Ka	32.703646GHz	32.703353GHz

GRACE 系统的 KBR 结构不能实现频率的优化设置。GRACE 系统的 KBR 结构如图 2 所示^[7],其中每颗卫星的 K 频段和 Ka 频段载波信号用同一个超稳定晶振(USO)倍频得到,且双星相同频段使用相同倍数的倍频器,而双星之间的频差通过使用不同频率的 USO 来实现。基于以上设计,必然导致 Ka 频段的双星频差大于 K 频段的双星频差,从而无法实现如表 1 所示的优化频率设置。因此,要实现频率的优化设置,必须改进 GRACE 系统的 KBR 结构。

在 GRACE 系统 KBR 的基础上,本文提出了一种改进频率流程的 KBR 系统结构,如图 3 所示。双星使用相同频率的 USO,每颗卫星的 K 频段和 Ka 频段仍用同一个 USO 驱动,但发射载波信号改为用锁相频率综合单元来产生。在锁相频率综合单元中,经取样下变频后的发射载波信号通过锁相环锁定到 DDS 输出信号上,因此双星每个频段的频差即等于两个 DDS 输出信号之间的频差,利用 DDS 可以方便地设置期望的频率。

使用改进频率流程的 KBR 系统结构与 GRACE 的 KBR 系统相比,需要改变频率综合单元并加入 DDS,硬件复杂度有所增加,但却具有如下几个优点:

(1) 可根据需要方便地实现频率优化设置;

(2) 双星使用相同频率的 USO,所以硬件一致性很好;

(3) 利用 DDS 可在轨实现补偿系统频率漂移。

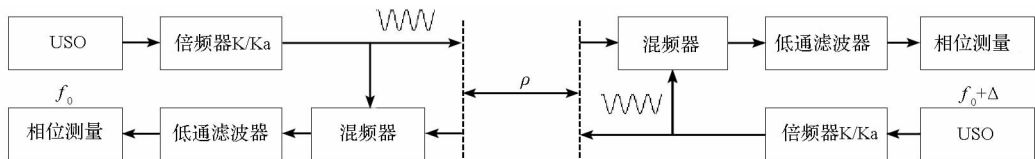


图 2 GRACE 系统的 KBR 结构

Fig. 2 The KBR structure of GRACE

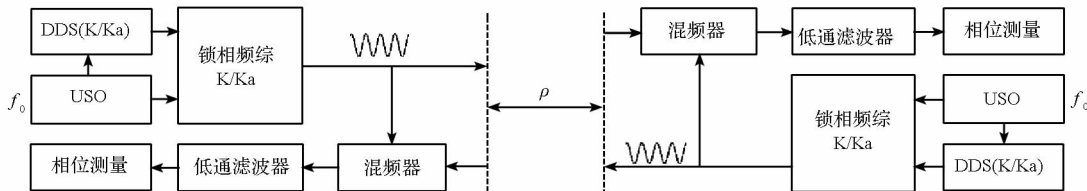


图 3 改进的 KBR 结构

Fig. 3 The mended KBR structure

4 实验验证

为验证新时标误差校正方法和改进 KBR 系统结构有效性,利用自研 KBR 系统进行了实验。自研 KBR 系统的 USO 使用瑞士 OSCILLOQUARTZ S. A 公司生产的 OCXO8607,其输出频率为 10MHz,短期稳定度优于 $5 \times 10^{-13}/2s$ (阿伦标准差)。实验中系统工作在如表 2 所示的两组频率下,其中一组为优化的频率设置,而另一组则是与 GRACE 系统类似的参考频率设置。

表 2 实验频率设置

Tab. 2 Frequency configuration for experiments

卫星/频段	优化频率	参考频率
KBR1/15GHz	15.000900GHz	15.000900GHz
KBR2/15GHz	15.001860GHz	15.001860GHz
KBR1/20GHz	20.001200GHz	20.001200GHz
KBR2/20GHz	20.001919964GHz	20.002500GHz

实验比较了两台 KBR 之间无时标偏差和存在较大时标偏差抖动两种条件下的测距精度。KBR1 的采样脉冲按照均匀的 0.1s 周期产生,而星间时标偏差通过改变 KBR2 的采样周期来实现,所要增加或者减少的工作时钟周期数用 Matlab 事先仿真产生,存储于 KBR2 的数字基带中,工作时通过查表决定采样脉冲产生的时刻。每个采样点处的时标偏差均设为数字基带工作时钟周期(5ns)的整数倍。每组频率的实验时间均为 2h,前面 1h 的星间时标偏差设为 0,后面 1h 的星间时标偏差数据(36 000 个采样点)如图 4 所示,其均值约为 0.04ns,标准差约为 10.1ns。

实验系统的连接关系如图 5 所示。KBR2 与 KBR1 对载波相位的采样脉冲用同一个 USO 驱动,实验开始时 KBR1 向 KBR2 发送一个同步信

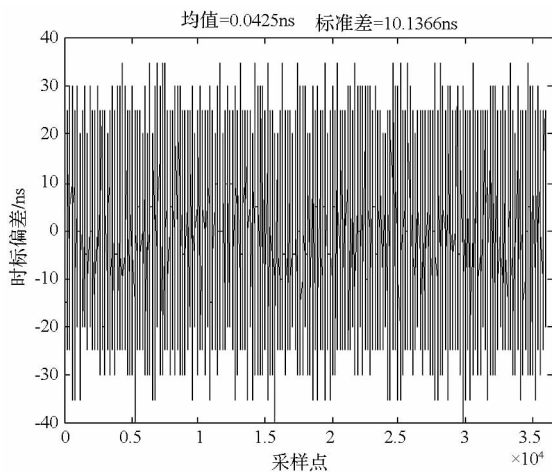


图 4 时标偏差仿真数据

Fig. 4 Simulated time-tag offset

号,使二者采样脉冲之间完成初始同步,如此可以保证产生预设的星间时标偏差。两个 KBR 采集的双频单程载波相位通过网络接口汇总到 PC 机中,由 DOWR 处理软件计算星间距离并进行相关的误差校正。

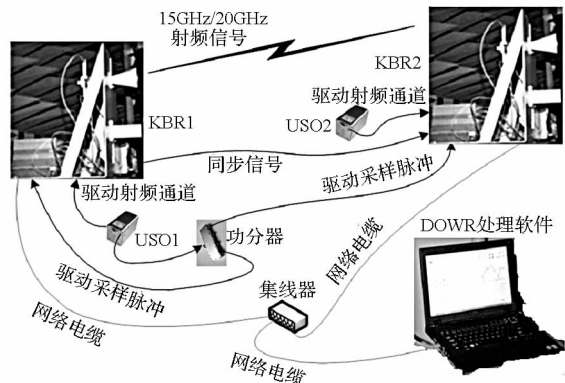


图 5 实验系统的连接关系

Fig. 5 Connection of the experiment

实验测试数据如图 6 所示,其中图 a 为参考频率设置下的双频组合测距误差,图 b 和图 c 分

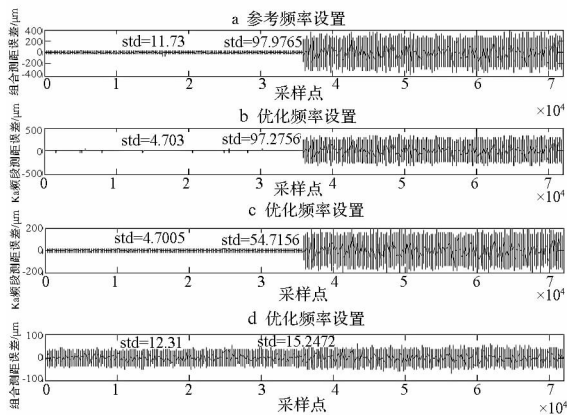


图6 实验数据

Fig. 6 Experimental results

别为优化频率设置下的K和Ka频段测距误差,图d为优化频率设置下的双频组合测距误差。每幅图中前半部分为无时标偏差条件下的数据,后半部分为存在较大时标偏差抖动条件下的数据,并且由于实验关注的是时标误差,所有数据都减去了均值以使实验结果更加直观。由图易知,当双星之间时标偏差为0时,优化频率设置下K和Ka频段的单频测距误差均约为 $4.7\mu\text{m}$,而优化频率和参考频率设置下的组合测距误差分别为 $11.73\mu\text{m}$ 和 $12.31\mu\text{m}$,此时的测距误差主要包含相位噪声误差和随机测量误差(包括多径效应和热噪声等),因此两种频率设置下的组合测距误差之间差别不明显,而由于双频之间不相关的随机测量误差叠加在一起,使得组合测距误差大于单频测距误差。当存在 10ns 时标偏差抖动时,测距误差中占主导地位的是时标误差,优化频率设置下K和Ka频段的单频测距误差分别为 $97.3\mu\text{m}$ 和 $54.7\mu\text{m}$,后者小于前者是由于Ka频段载波频率高并且双星频差小,所以其时标误差小;参考频率设置下的组合测距误差为 $97.98\mu\text{m}$,而尽管优化频率设置下的单频测距误差依然很大,其组合测距误差却只有 $15.25\mu\text{m}$,相对于频率优化前得到了大幅度的抑制,证明基于频率优化和双频组合的时标误差校正方法能很好地修正KBR的时标误差。

5 结论

本文研究了不依赖于对星间时标偏差精确测量的KBR时标误差校正方法,该方法利用双频时标误差之间的相关性,通过优化设置载波频率,结合校正电离层效应的双频组合观测值来实现;从星间DOWR测距原理出发建立了时标误差的模型,推导了优化频率之间应当满足的定量关系,为

选择KBR系统的频率提供了理论指导;并针对频率优化设置的实现问题,在GRACE系统KBR的基础上改进了其频率流程,设计了一种新的KBR系统结构;最后利用自研的KBR系统进行了实验,实验结果表明基于频率优化的时标误差校正方法和改进的KBR系统结构能很好地校正时标误差。在我国当前技术条件下,本文研究成果对于自主研发KBR具有重要的实用价值,可应用于将来的SST-LL地球重力测量卫星的有效载荷中。

参考文献 (References)

- [1] 王正涛,姜卫平,晁定波. 卫星跟踪卫星测量确定地球重力场的理论与方法[M]. 武汉:武汉大学出版社,2011:5-13. WANG Zhengtao, JIANG Weiping, CHAO Dingbo. Theory and method of Earth gravity field fixing using satellite-to-satellite tracking measurement[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2011:5-13. (in Chinese)
- [2] Dunn C, Bertiger W, Franklin G, et al. The instrument on NASA's GRACE mission: augmentation of GPS to achieve unprecedented gravity field measurements[C]// Proceeding of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2002), Portland, OR, 2002.
- [3] Kim J, Lee S W. Flight performance analysis of GRACE K-band ranging instrument[J]. Acta Astronautica, 2009, 65: 1571-1581.
- [4] Kim J, Lee Y J. Measurement interpolation methods for dual one-way ranging systems[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2009, 3: 707-712.
- [5] Ko U D, Tapley B D. Computing the USO frequency instability of GRACE satellites[C]//Proceedings of Aerospace Conference, 2010 IEEE, Big Sky, MT, 2010, 1-8.
- [6] Frommknecht B, Schlicht A. The GRACE gravity sensor system[J]. System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques, Advanced Technologies in Earth Sciences, 2010, Part 2:105-118.
- [7] 余世刚,王锴,周毅,等. 高精度星间微波测距技术[J]. 宇航学报, 2006, 3:402-406. SHE Shigang, WANG Kai, ZHOU Yi, et al. The technology of high accuracy inter-satellite microwave ranging[J]. Chinese Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 402-406. (in Chinese)
- [8] 申健,余世刚,王锴,等. 重力卫星星间高精度测距技术研究[J]. 空间科学学报, 2007, 4:342-346. SHEN Jian, SHE Shigang, WANG Kai, et al. Study on inter-satellite high accuracy ranging technology for gravity satellite[J]. Chinese Journal of Space Science, 2007, 27(4):342-346. (in Chinese)
- [9] 康开轩,李辉,邹正波,等. 精密星间微波测距系统观测数据模拟与预处理技术[J]. 大地测量与地球动力学学报, 2011, 31(2):71-75. KANG Kaixuan, LI Hui, ZOU Zhengbo, et al. Simulation of measurements and pre-processing technology for high accurate inter-satellite microwave ranging system[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(2): 71-75. (in Chinese)
- [10] Thomas J B. An analysis of gravity-field estimation based on inter-satellite dual-1-way biased ranging[R]. Jet Propulsion Lab, California Institute of Technology, JPL Publication, 1999.
- [11] Dunn C, Bertiger W, Bar-Sever Y, et al. Application challenge: instrument of GRACE GPS augments gravity[J]. GPS World, 2003, 2:16-28.