引文格式:邹贤才,赵敏星,衷路萍,等.广义一步法研究及其仿真[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(5):836-844.DOI:10.13203/j.whugis20240102

Citation:ZOU Xiancai,ZHAO Minxing,ZHONG Luping,et al.Research on the Integrated Approach and Its Simulation[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(5):836-844.DOI:10.13203/j.whugis20240102

广义一步法研究及其仿真

邹贤才[1,2] 赵敏星[1,2] 衷路萍[3,4] 潘娟霞[1,2]

1 武汉大学测绘学院,湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079
2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079
3 中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室,湖北 武汉,430071
4 武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站,湖北 武汉 430071

摘 要:广义一步法可在观测值层面实现多种空间大地测量技术、多种类型观测数据的整体解算,是多源空间大地测量数据融合和统一产品生成的重要方法。以地基全球导航卫星系统和重力卫星观测数据为例,构建了广义一步法的多级观测数据联合处理模型,描述了其实现方法,并基于自主开发的平台开展了仿真实验;分析使用广义一步法对地球重力场参数、重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment,GRACE)卫星及全球定位系统(global positioning system,GPS)卫星精密定轨的影响。结果表明,广义一步法中增加GPS卫星地面观测后,改善了地球重力场模型的二阶项精度,比只使用GRACE卫星观测数据的同解法精度提升了约70%;同时相较于只使用地面站的GPS精密定轨结果,广义一步法中增加的两颗GRACE卫星的星载观测可以改善GPS卫星轨道精度,总体上GPS卫星轨道3D均方根平均提升约4.7%,地面跟踪弧段较短的情况下,轨道3D均方根最高可提升54%。

关键词:广义一步法;同解法;卫星跟踪卫星;地面跟踪GNSS;星载GNSS;多级数据融合

中图分类号:P207 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-05-26

DOI:10.13203/j.whugis20240102 **文章编号**:1671-8860(2025)05-0836-09

Research on the Integrated Approach and Its Simulation

ZOU Xiancai[1,2] *ZHAO Minxing*[1,2] *ZHONG Luping*[3,4] *PAN Juanxia*[1,2]

1 School of Geodesy and Geomatics, Hubei Luojia Laboratory, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China
3 Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China
4 Gravitation and Earth Tide, National Observation and Research Station, Wuhan 430071, China

Abstract: **Objectives**: The integrated approach is a significant method that can be used to integrate multi-source spatial geodetic observations. It can achieve an overall solution for various types of observations at the observation level. We describe the multilevel observations combination based on the integrated approach. **Methods**: The model and technological route of the integrated approach are explained using ground-based global navigation satellite system (GNSS) and gravity satellite observations as an example. Simulation experiments are accomplished based on self-developed software. **Results**: The analysis of the effects of the Integrated Approach and the step-by-step method on the parameters of the Earth's gravity field, as well as the orbits of gravity recovery and climate experiment (GRACE) and global positioning system(GPS) satellites, is presented. The results indicate that the Earth's gravity field model parameters solved by the integrated approach have smaller errors compared to the simultaneous solution, due to the additional GPS orbital observation information. The addition of GRACE satellite observations can improve the GPS satellite orbits of the Integrated Approach compared to the ground station only. On average, the 3D root mean square (RMS) of GPS satellite orbits is improved by about 4.7%, and the orbit 3D RMS im-

基金项目:国家自然科学基金(U23A2028,41874021,42192533,42192532);中央高校基本科研业务费专项资金(2042023kfyq01)。

第一作者:邹贤才,博士,教授,主要研究方向为大地测量学。xczou@whu.edu.cn

通信作者:赵敏星,博士生。mxzhao@whu.edu.cn

provement is up to 54% of short ground tracking arc. **Conclusions**: These results demonstrate the important role of the Integrated Approach in the recovery of the earth's gravity field and the satellite's precision orbit determination. Future research will continue to use the Integrated Approach for real observation analysis.
Key words: the Integrated Approach; the Simultaneous Solution; satellite-satellites tracking; ground tracking GNSS; satellite-based GNSS; multilevel observations combination

确定地球形状大小、外部重力场、地面参考点的位置及其变化是大地测量的重要任务[1]。空间大地测量为上述目标的实现提供了多样化的观测手段,例如甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、激光测距(satellite laser ranging, SLR)、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)以及多普勒卫星测轨和无线电定位组合系统(Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite,DORIS)等。除河外射电源外,这些观测技术中卫星或为观测目标,或为观测平台,或兼而有之,构成了高-中-低不同轨道高度的卫星观测网,地面跟踪、卫星间相互跟踪观测,为研究者提供了覆盖地球的不同层次、不同种类、不同网型的观测数据,广泛应用于大地测量、卫星定轨、地球自转、大气海洋和水文学等多种领域[2]。不同观测技术的优势各异,多源观测数据的联合解算可以取长补短,发挥出单一技术难以实现的参数解算优势[3]。国际地球自转和参考系统服务组织(international earth rotation and reference systems service,IERS)的主要工作之一是使用多种空间大地测量技术(GNSS、SLR、VLBI和DORIS)建立和维持地球参考框架。IERS于2009年组建了研究多种空间技术观测值层面联合的工作组[4-5],用于研制最优的观测值层面技术联合的解算策略和平台,但由于观测和计算条件的限制,目前最新的ITRF2020框架仍然是基于法方程文件实现的技术联合[3]。观测值层面的技术联合能得到更严密的解[4-6],可生成统一的包括天球参考框架、地球参考框架、地球定向参数和地球重力场的大地测量产品[5,7],是大地测量学数据处理的发展趋势和研究热点[8-10]。

在未来空间基准建设中,几何和物理参数是一体的,重力卫星数据必然是多源数据融合的重要内容[11-12]。2004年Zhu等[13]提出将导航卫星与重力卫星的观测值联合处理,建立统一的动力学函数关系,同时解算地球重力场模型、导航卫星和重力卫星精密轨道等参数,这种方法称为Integrated Approach,该方法可以将地球的几何参考框架和重力场联系起来,是理论上更加严密的联合多源数据建立地球参考框架的方法。中国国内将Integrated Approach称为一步法[14](也译作整体法),在具体实现过程中将其进一步细称为广义一步法,对应地将固定导航卫星的信息,同时处理重力卫星星载GNSS和星间测距数据的方法称为狭义一步法[15],也称为同解法[16-17]。本文均采用一步法指代广义一步法,同解法[16]指代狭义一步法。通过对比使用的观测数据和解算的主要参数类型等,可以区分一步法、同解法和地面站解算模式(表1)。相较于一步法,同解法和地面站是分步法。一步法的数据融合思想与IERS提出的基于观测值层面的技术联合是高度一致的[4],研究表明,该方法可以有效改善卫星星历、地心和重力场参数的精度[13,18],实现动力学地球参考框架的建立[4]。从同解法到一步法需要增加地面GNSS观测数据,涉及的观测数据量大,增加的参数众多,联合模型的建立和海量参数的估计存在难度,国内暂未见相关报道。一步法适用场景丰富,本文选择地面GNSS观测和GRACE星载观测联合确定地球重力场和卫星精密轨道作为研究内容,重点在于一步法技术路线的建立,通过仿真实验探讨目前计算条件下一步法的实现过程和参数解算的优势。

表 1　解算模式的比较

Table 1　Comparison of Different Methods

方法	观测数据	主要参数	基准来源
地面站	地面GNSS观测	GNSS卫星轨道、钟差等参数	地面测站
同解法	重力卫星星载GNSS观测	地球重力场参数	GNSS卫星精密星历和钟差产品
	重力卫星星间跟踪观测	重力卫星轨道、钟差等参数	
一步法	重力卫星星载GNSS观测	地球重力场参数	地面测站
	重力卫星星间跟踪观测	重力卫星轨道、钟差等参数	
	地面GNSS观测	GNSS卫星轨道、钟差等参数	

1 一步法原理与实现方法

1.1 观测模型的统一表达

为了适应不同层次观测技术的解算需求,实现观测值层面的多种观测数据联合解算,首先要建立多类观测数据的统一模型。以本文所使用的观测数据类型为例,地面GNSS观测的双频消电离层观测模型为:

$$\begin{cases} L_{\mathrm{ground}_r}^{\mathrm{GNSS}_s}=\rho(\boldsymbol{r}_{\mathrm{ground}_r},\boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s})+c(\mathrm{d}t_{\mathrm{ground}_r}-\mathrm{d}t^{\mathrm{GNSS}_s})+m_r^s\cdot Z_r+\mathrm{d}\rho_{\mathrm{windup}}+\mathrm{d}\rho+\lambda N_{rs}+\varepsilon_L \\ P_{\mathrm{ground}_r}^{\mathrm{GNSS}_s}=\rho(\boldsymbol{r}_{\mathrm{ground}_r},\boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s})+c(\mathrm{d}t_{\mathrm{ground}_r}-\mathrm{d}t^{\mathrm{GNSS}_s})+m_r^s\cdot Z_r+\mathrm{d}\rho+\varepsilon_P \end{cases} \tag{1}$$

式中,L表示载波相位距离观测;P表示测距码伪距观测;GNSS_s表示GNSS卫星s;ground_r表示地面测站r;$\boldsymbol{r}_{\mathrm{ground}_r}$表示测站$r$的位置矢量;$\boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s}$表示卫星$s$的位置矢量;$\rho(\cdot)$表示GNSS卫星$s$和地面测站$r$之间的几何距离项;$\rho(\boldsymbol{r}_{\mathrm{ground}_r},\boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s})=\left|\boldsymbol{r}_{\mathrm{ground}_r}-\boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s}\right|$,$|\cdot|$表示矢量的模;$\mathrm{d}t$表示钟差改正项;$m_r^s\cdot Z_r$表示测站的对流层改正项,其中$m_r^s$表示映射函数,$Z_r$表示天顶对流层延迟;$\mathrm{d}\rho_{\mathrm{windup}}$表示相位缠绕改正项;$\mathrm{d}\rho$表示残余的高阶电离层影响、天线相位中心变化、多路径延迟等其他距离改正项;λ表示消电离层组合观测值的波长;N_{rs}表示消电离层组合的相位模糊度(不具备整周特性);ε_L表示载波相位的观测噪声;ε_P表示测距码的观测噪声。

重力卫星星载GNSS观测的双频消电离层观测模型为:

$$\begin{cases} L_{\mathrm{LEO}_g}^{\mathrm{GNSS}_s}=\rho(\boldsymbol{r}_{\mathrm{LEO}_g},\boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s})+c(\mathrm{d}t_{\mathrm{LEO}_g}-\mathrm{d}t^{\mathrm{GNSS}_s})+\mathrm{d}\rho+\lambda N_{gs}+\varepsilon_L \\ P_{\mathrm{LEO}_g}^{\mathrm{GNSS}_s}=\rho(\boldsymbol{r}_{\mathrm{LEO}_g},\boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s})+c(\mathrm{d}t_{\mathrm{LEO}_g}-\mathrm{d}t^{\mathrm{GNSS}_s})+\mathrm{d}\rho+\varepsilon_P \end{cases} \tag{2}$$

式中,除了LEO_g表示重力卫星g,这里的符号与地面站模型中的一致,$\boldsymbol{r}_{\mathrm{LEO}_g}$表示重力卫星$g$的位置矢量;$N_{gs}$表示星载GNSS的消电离层组合相位模糊度。需要注意的是,重力卫星的轨道高度大于200 km,可以忽略对流层影响。

重力卫星任务GRACE采用K/Ka波段测距系统提供星间跟踪观测,距离变率的观测(K-band range-rate,KBRR)模型为:

$$RR_{\mathrm{LEO}_g}^{\mathrm{LEO}_j}=\dot{\rho}(\boldsymbol{r}_{\mathrm{LEO}_g},\boldsymbol{r}^{\mathrm{LEO}_j})+\mathrm{d}\dot{\rho}_{\mathrm{light_time}}+\mathrm{d}\dot{\rho}_{\mathrm{ant_center}}+\varepsilon_{RR} \tag{3}$$

式中,RR代表距离变率观测量;$\dot{\rho}(\cdot)$表示两颗卫星之间的几何距离对于时间的导数函数;$\mathrm{d}\dot{\rho}_{\mathrm{light_time}}$、$\mathrm{d}\dot{\rho}_{\mathrm{ant_center}}$分别是光行时改正和天线相位中心改正对应的距离变率改正项;重力卫星LEO_g表示信号接收端的卫星;LEO_j表示信号发射端的卫星。

经分析,以上观测模型可以归纳为观测站、观测目标状态之间的泛函:

$$O=f\left(\boldsymbol{r}_s,\boldsymbol{r}^o,\boldsymbol{p}\right)+\varepsilon \tag{4}$$

式中,观测模型是包括$\boldsymbol{r}_s$、$\boldsymbol{r}^o$、$\boldsymbol{p}$的函数$f(\cdot)$,其中$\boldsymbol{r}_s$表示观测站状态;$\boldsymbol{r}^o$表示观测目标状态;$\boldsymbol{p}$表示与观测改正模型有关的参数;ε为观测的偶然误差;O代表了上述地面GNSS观测、重力卫星星载GNSS观测和星间跟踪观测的广义观测值。为了方便描述具体的观测技术模型,这里区分了观测站和观测目标,实际上一个对象可以同时充当观测站和观测目标,在具体的算法设计时观测站和观测目标等价处理,均为"观测体"。同时,在这样的统一观测模型中,并不需要区分是属于高轨、中轨还是低轨卫星,所有卫星采用相同的方式描述,均基于轨道动力学模型进行轨道积分。这种方式可以保持不同技术中相同模型的同一性,消除由于模型不同可能引入的系统误差,避免"观测体"模型的冗余。不同观测技术的相同模型参数是进行联合处理的纽带,例如地球重力场参数就是地面GNSS观测、星载GNSS观测和星间距离变率的公共参数。此外,导航卫星、重力卫星的轨道初值等参数也是部分观测的共同参数。

1.2 待估参数的统一描述

在估计参数时,设计矩阵根据需要估计的参数对应给出,可以将参数分为与观测改正模型有关的直接参数、与"观测体"有关的间接参数。参数矢量形式为$\hat{\boldsymbol{x}}=[\ \boldsymbol{r}\quad\boldsymbol{p}\quad\boldsymbol{X}\ ]$,其中$\boldsymbol{r}$和$\boldsymbol{p}$为直接参数,分别表示"观测体"状态参数和几何距离改正模型参数,$\boldsymbol{X}$为间接参数,表示与"观测体"状态函数有关的参数,这些参数对应的设计矩阵部分为:

$$\frac{\partial O}{\partial \boldsymbol{r}}\ \frac{\partial O}{\partial \boldsymbol{p}}\ \frac{\partial O}{\partial \boldsymbol{r}}\cdot\frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial \boldsymbol{X}} \tag{5}$$

在本文的一步法解算中,参数$\boldsymbol{r}$涵盖$\boldsymbol{r}_{\mathrm{ground}_r}$、$\boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s}$、$\boldsymbol{r}_{\mathrm{LEO}_g}$、$\boldsymbol{r}^{\mathrm{LEO}_j}$,参数$\boldsymbol{p}$包括$\mathrm{d}t_{\mathrm{ground}_r}/\mathrm{d}t_{\mathrm{LEO}_g}/\mathrm{d}t^{\mathrm{GNSS}_s}$、$N_{rs}/N_{gs}$、$Z_r$,参数$\boldsymbol{X}$包括地球重力场模型(Earth gravitational model,EGM)参数p_{EGM}、卫星的轨道初值p_{t_0}、GNSS卫星的太阳辐射压(solar radiation pressure,SRP)模型参数p_{SRP}、重力卫星加速度校准参数p_{acc}等。这些不同参数对应的设计矩阵元素的计算,对应参数各自的数学模型,诸如轨道

动力学模型、地面测站线性模型、各种技术的观测模型等,这些模型作为单独的模块,根据观测值类型的需要进行调用。例如,地球重力场模型在GNSS和重力卫星的轨道摄动模型中均起作用,因此设计矩阵中对地球重力场参数的偏导数计算有:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial O_{\mathrm{ground}_r}^{\mathrm{GNSS}_s}}{\partial p_{\mathrm{EGM}}}=\dfrac{\partial O}{\partial \boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s}}\cdot\dfrac{\partial \boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s}}{\partial p_{\mathrm{EGM}}}\\ \dfrac{\partial O_{\mathrm{LEO}_g}^{\mathrm{GNSS}_s}}{\partial p_{\mathrm{EGM}}}=\dfrac{\partial O}{\partial \boldsymbol{r}_{\mathrm{LEO}_g}}\cdot\dfrac{\partial \boldsymbol{r}_{\mathrm{LEO}_g}}{\partial p_{\mathrm{EGM}}}+\dfrac{\partial O}{\partial \boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s}}\cdot\dfrac{\partial \boldsymbol{r}^{\mathrm{GNSS}_s}}{\partial p_{\mathrm{EGM}}}\\ \dfrac{\partial O_{\mathrm{LEO}_g}^{\mathrm{LEO}_j}}{\partial p_{\mathrm{EGM}}}=\dfrac{\partial O}{\partial \boldsymbol{r}_{\mathrm{LEO}_g}}\cdot\dfrac{\partial \boldsymbol{r}_{\mathrm{LEO}_g}}{\partial p_{\mathrm{EGM}}}+\dfrac{\partial O}{\partial \boldsymbol{r}^{\mathrm{LEO}_j}}\cdot\dfrac{\partial \boldsymbol{r}^{\mathrm{LEO}_j}}{\partial p_{\mathrm{EGM}}}\end{cases}\tag{6}$$

这里的观测值类型包括载波相位、测距码伪距和星间距离变率。在不同类型的观测值进行联合处理时,观测值的初始权重来自经验值,解算过程中采用方差分量估计方法对不同类别观测值的权重进行调整。

为了解算中高阶重力场,通常采用一个月的观测数据,钟差这类历元参数数量巨大,会导致一步法中的参数难以进行高效解算。因此在组建法方程时,需要对参数进行分类和排列,获得利于高效解算的特定法方程结构。比如,将与特定卫星有关的参数、与特定测站有关的参数和全局参数按照一定的顺序进行排列(图1仅为示意,实际时段参数会存在交叉部分),最大限度地利用法方程的稀疏矩阵特性及相应算法提升计算效率[19-20]。

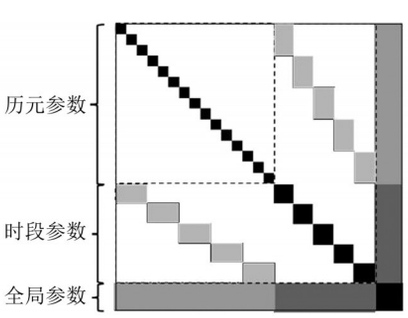


图 1　法方程参数排列和结构示意图

Fig. 1　Schematic of the Parameter Arrangement and Structure of the Normal Equation

根据不同参数的特性,例如属于不同“观测体”(测站/导航卫星/重力卫星等)、不同模型类别(轨道初值、加速度计、重力场等),对参数进行分类和排列,建立一个统一的参数配置文件。该文件用于实现不同技术类别待估参数的统一管理,使观测层面联合的参数解算成为可能,通过合理的参数消元策略,可进行公共参数和非公共参数的统一解算。此外,通过这种方式可以将需要解算的模型参数与具体的观测技术以及具体的观测数据文件进行解耦合,为多参数估计及其并行计算提供极大的灵活性。在这种模式下,如果增加新的观测技术,只需要修改法方程组建部分的模型;而如果增加新的估计参数,只要待估参数可以定义为全局参数、时段参数或者历元参数,将其表示在统一的参数文件中,不需要对参数解算部分的算法进行修改,即可纳入现有解算参数的框架统一处理。

笔者团队一直从事卫星重力场建模方面的研究,基于上述一步法的统一思想自主开发了大地测量数据处理平台,平台基于Linux/UNIX环境开发,核心代码使用Fortran语言,部分代码采用c编写,通过Shell脚本进行流程定义,以命令行模式运行。早期根据任务计算量软件采用多线程并行,现在已经迭代发展至MPI/OpenMP混合并行模式[21]。目前平台可以支持SLR、GNSS和低轨GRACE/重力场与稳态洋流探测器重力卫星数据的单独和联合处理,可以进行地球重力场参数反演、卫星精密定轨、地心时间序列解算、加速度计校准等[22-23],本文的一步法相关的仿真实验均使用该软件平台进行。为实现一步法解算,实验中所有计算工作均在高性能计算集群上进行,集群上每节点2个AMD 7313中央处理器(共32核),操作系统为Ubuntu,集群使用slurm作业调度系统。以本文的最大计算量为例,实验中使用一个月的观测,包括地基GNSS弧段3 100个,GRACE星载GNSS弧段906个、GRACE KBRR弧段401个,法方程单个弧段计算需要约3 min左右,按照弧段进行并行计算,在集群上提交至10个节点并行,生成法方程耗时约40 min。另外,一步法待估参数包括地球重力场参数、卫星轨道参数、模糊度参数约52万个,钟差参数约2 700万个,参数解算采用并行算法在集群上使用10个节点并行,单次迭代时间约3 h,计算时间是可接受的。

2　仿真实验与分析

一步法仿真实验流程如图2所示,具体实验内容包括:(1)使用国际GNSS服务(international GNSS service,IGS)地面跟踪站和GPS轨道初值[24],仿真地面站的GPS跟踪数据,用仿真观测值进行GPS卫星精密轨道确定;(2)使用真实加速度计观测数据仿真GRACE卫星轨道,联合步

骤(1)仿真的GPS精密轨道结果获得GRACE星载GPS和KBRR的仿真观测值,通过同解法对GRACE卫星精密轨道和地球重力场进行确定;(3)综合步骤(1)和(2)的仿真数据,联合地面GPS+GRACE观测数据实现卫星精密轨道和地球重力场的一步法解算。仿真实验的流程图如图2所示,实验选择的时间为2009年8月,共选取了100个IGS的地面跟踪站,站点的具体分布如图3所示,实验中使用的卫星为GPS星座32颗卫星和GRACE A/B两颗卫星,具体模型和策略如表2所示。

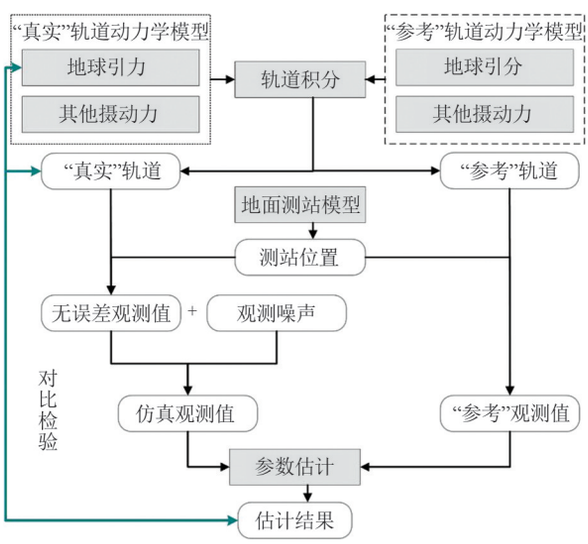


图2 一步法仿真实验流程

Fig. 2 Experimental Flow of the Integrated Approach Simulation

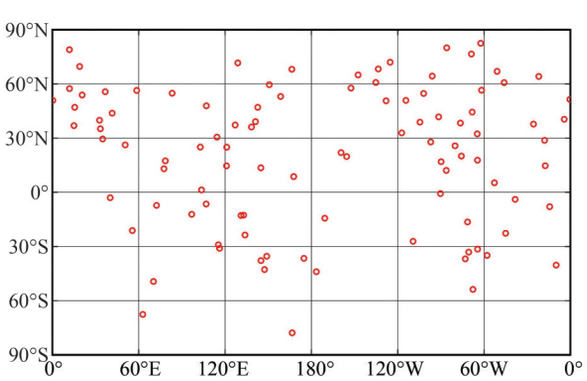


图3 一步法仿真实验选择的IGS地面测站全球分布图

Fig. 3 Global Distribution of IGS Ground Stations Selected for the Integrated Approach Simulations

关于参数解算策略,设置如下:由于GPS和GRACE卫星轨道高度(GPS约22 000 km,GRACE约300~500 km)和轨道倾角(GPS:55°,GRACE:89°)不同,对重力场参数的敏感性不同,GRACE卫星可以探测的信号阶数远大于GPS卫星,实验中GRACE估计的重力场参数最大阶数设置为60阶,GPS设置为2阶,重力场参数为月解;GRACE卫星轨道初值每个弧段估计一组,加速度计参数包括尺度和偏差参数,其中尺度参数一个月估计一组,偏差参数每个弧段估计一组,弧段长度为1.5 h;GPS卫星轨道初值和太阳辐射压模型ECOM(empirical code orbit model)参数均为每天估计一组;实验中固定GPS卫星的钟差作为钟差基准,地面站和GRACE卫星的接收机钟差均作为历元参数进行估计;模糊度参数是消电离层组合模糊度,不具备整数特性,估计为浮点解。

一步法解算时的方差分量估计收敛情况如表3所示,3次迭代即可收敛,收敛后方差分量和仿真实验设置的观测误差水平一致。在仿真实验中,通过将同解法、一步法、地面站模式各参数解算结果与"真实"模型中的真实值进行对比,分析一步法参数解算结果的有效性及改善程度。

2.1 地球重力场

首先,对一步法和同解法解算的地球重力场参数的误差及其分布进行对比和分析,图4展示了一步法和同解法估计的地球重力场位系数的阶误差RMS(root mean square)。仿真实验中同解法使用的观测数据是GRACE星载GPS和KBRR数据,一步法在此基础上增加了100个地面站的GPS观测数据。加入GPS卫星的轨道动力学信息后,地球重力场二阶项的阶误差显著降低,一步法解算的重力场二阶项精度比同解法提升约70%。

表4列出了一步法、同解法、地面站模式的5个地球重力场二阶项位系数解算误差,并对比分析了各种类型观测数据解算二阶项位系数的性能。可以看到,由于GRACE轨道特性、海潮S_2混频等影响,同解法C_{20}解算结果精度较差[30-31],地面站模式下GPS卫星可以较好地恢复C_{20},因此一步法中引入了GPS卫星的轨道信息后可以显著改善C_{20}的精度,相对同解法精度提高了54%。除C_{20}外,一步法解算其他二阶项位系数的精度也有所提高,尤其是C_{21}和S_{21},精度均提高了70%,从表4可以看出,这也归功于引入的GPS卫星轨道信息。虽然GPS卫星解算C_{22}、S_{22}的精度不及GRACE高,但一步法的解算结果相对同解法仍有8%~9%的提高。

以上结果表明,一步法解算的每个重力场二阶系数都优于分步法的结果,该方法可以改善单独使用GRACE数据或者地面GPS数据解算的

地球重力场低阶项系数的精度,得到一个综合GRACE和GPS的高阶地球重力场模型。

表 2　一步法仿真实验模型和解算策略总结

Table 2　Summary of Models and Strategies for the Integrated Approach Simulations

项目	类型	“真实”模型	“参考”模型	备注
轨道动力学模型	地球引力	EIGEN-6C4[25]	设置的偏差模型	200阶次
	地球引力时变	2~4阶改正	2~4阶改正	IERS 2010 协议
	N体引力	JPL DE405	JPL DE405	
	固体潮、极潮	IERS 2010 协议[26]	IERS 2010 协议	
	海潮	EOT11a	EOT11a	120阶次
	大气与海洋产品	AOD1B RL05[27]	AOD1B RL05	100阶次
	相对论效应	IERS 2010 协议	IERS 2010 协议	
	太阳辐射压	GPS ECOM经验模型[28] GRACE加速度计观测	GPS ECOM经验模型 GRACE加速度计观测	GRACE卫星非保守力采用加速度计实测数据
	其他非保守力	GPS未考虑 GRACE加速度计观测	GPS未考虑 GRACE加速度计观测	
地球参考框架	地球参考框架	ITRF2014[29]	ITRF2014	
	地球定向参数	IERS EOP 14 C04产品[29]	IERS EOP 14 C04产品	
	岁差章动模型	IAU 2006/2000A	IAU 2006/2000A	
观测模型及误差	星座	GPS+GRACE A/B	GPS+GRACE A/B	
	GPS观测值	仿真GPS L1/L2伪距、载波相位	双频非差消电离层组合	
	KBRR观测值	仿真GRACE KBRR	GRACE KBRR	
	加速度计观测值	GRACE实测数据+设置的校准参数	GRACE实测数据	
	时段	2009年8月	2009年8月	
	采样间隔/s	10	10	
	截止高度角/(°)	10	10	
	观测值误差	GPS伪距 0.2 m GPS载波相位 0.002 m KBRR 1×10^{-7} m/s	GPS伪距 1 m GPS 载波相位 0.01 m KBRR 1×10^{-6} m/s	解算中采用方差分量估计调整观测值类型权重,设置KBRR观测值权重为1
	相对论效应	IERS 2010 协议	IERS 2010 协议	
	其他改正项	未考虑	未考虑	

表 3　一步法仿真实验单位权方差因子收敛情况

Table 3　Convergence of the Unit Weight Variance Factor of the Integrated Approach Simulation

项目	迭代次数				
	1	2	3	4	5
KBRR/10^{-6}	0.783 9	0.107 4	0.106 9	0.106 5	0.106 5
GNSS/10^{-6}	0.172 3	0.783 8	0.107 4	0.106 9	0.106 5
比值	4.548 7	0.137 0	0.995 3	0.996 2	1.000 0

2.2　GARCE卫星轨道

一步法和同解法解算的GRACE A卫星一个月轨道径向方向(R)、沿轨方向(T)、轨道法向方向(N)的误差分布如图5所示,GRACE B卫星的情况类似。对于GRACE卫星轨道,使用一步法和同解法解算的结果一致,通过表5统计分析可以看到,一步法的轨道RMS略优于同解法,两者的误差水平基本相当。

2.3　GPS卫星轨道

对一步法和只使用地面站的GPS卫星定轨结果进行对比分析。解算使用的GPS卫星共32颗,各颗卫星整个月的R、T、N方向的轨道误差统计结果如图6所示。总体来讲,地面站和一步法的轨道精度水平相当。但相较于地面站的定轨结果,由于增加了GRACE卫星的星载观测,一步法的GPS卫星轨道精度有所改善,例如图6地面站模式中误差较为明显的GPS G05卫星。需要指出的是,仿真实验中GPS卫星以1 d为间隔进行轨道相关参数的设置,这个月的数据中G05卫星从2009-08-21T17:30:00后才有跟踪数据,因

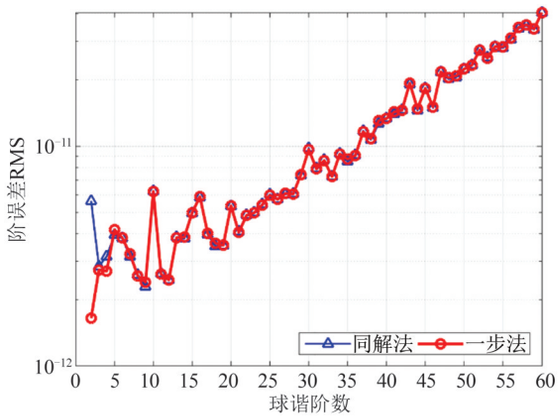


图4 一步法和同解法地球重力场参数阶误差对比

Fig. 4 Comparison of the Degree Errors of the Earth's Gravity Field Parameters Between the Integrated Approach and the Simultaneous Solution

表4 一步法和分步法解算的重力场模型二阶项系数的误差对比

Table 4 Errors in Degree-2 Coefficients of Gravity Field Models Recovered by the Integrated Approach and the Step-by-Step Methods

球谐系数	一步法/10^{-13}	同解法/10^{-13}	地面站/10^{-13}	一步法相对于同解法改善/%	一步法相对于地面站改善/%
C_{20}	5.664 9	12.41 0	6.427 1	54.35	11.86
C_{21}	2.210 1	7.424 6	2.363 1	70.23	6.47
S_{21}	2.219 8	7.419 5	2.364 8	70.08	6.13
C_{22}	6.512 1	7.096 7	15.122 0	8.24	56.94
S_{22}	6.795 3	7.499 5	14.814 0	9.39	54.13

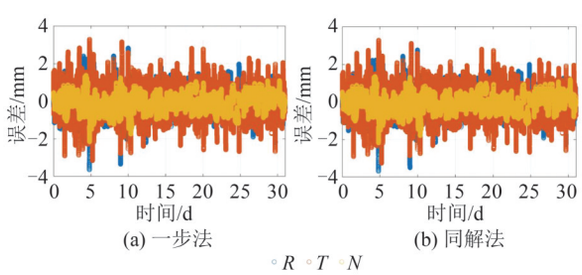


图5 GRACE A卫星一步法和同解法的轨道误差对比

Fig. 5 Comparison of GRACE A Satellite Orbit Errors Between the Integrated Approach and the Simultaneous Solution

此G05卫星在2009-08-21这一天是一个约6 h的短弧段,且G05卫星在整个月中用于统计分析的时间序列远短于其他卫星。不同于常规的24 h弧段有100个地面测站跟踪观测,在G05卫星2009-08-21这一天的17:30:00至24:00:00弧段,跟踪到该卫星的地面站个数只有63个,一步法中增加的GRACE星载观测值个数占总观测值个数的比例从日平均的1.3%上升至2.7%,且补充了测站的分布(图7),

表5 一步法和同解法的GRACE卫星轨道误差对比/mm

Table 5 Comparison of GRACE Satellites Orbit Error Between the Integrated Approach and the Simultaneous Solution/mm

方向	GRACE A		GRACE B	
	一步法	同解法	一步法	同解法
R	0.422 2	0.422 8	0.429 7	0.430 7
T	0.662 0	0.663 4	0.676 0	0.677 5
N	0.424 0	0.423 7	0.392 5	0.395 8
3D	0.892 3	0.893 6	0.892 0	0.895 1

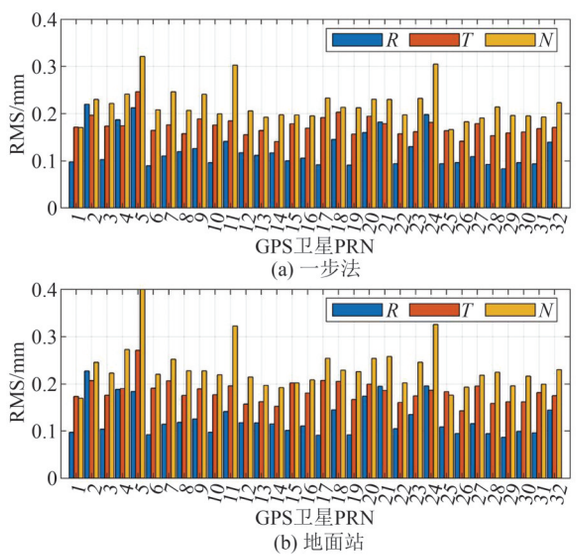


图6 一步法和地面站GPS卫星轨道误差RMS对比

Fig. 6 Comparison of GPS Satellite Orbit Error RMS Between theIntegrated Approach and the Ground-Station-Only

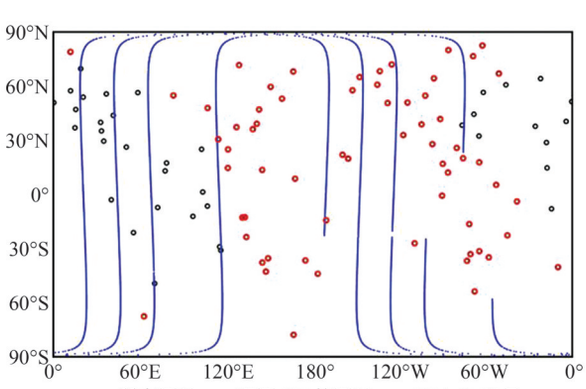


图7 2009-08-21弧段跟踪观测GPS G05卫星的地面测站和GRACE卫星分布

Fig. 7 Ground Stations and GRACE Satellites Tracked GPS G05 Satellites on August 21, 2009

最终该弧段的卫星轨道精度在*N*方向提升约66%,3D RMS提升约54%(表6)。整个月统计中,一步法解算的GPS G05卫星轨道法向*N*方向的精度比地面站提升了约50%,3D RMS提升了34%;除GPS

G05卫星外,相较于地面站,一步法的轨道精度在轨道R方向最高提升了13%,在T方向最高提升了15%,在N方向最高提升了13%,3D RMS最高提升了10%;对于除G05卫星外其他所有的GPS卫星,一步法的轨道精度在R、T、N方向平均提升分别约2.4%、4.9%、5.0%,3D RMS平均提升约4.7%。

表 6　一步法和地面站的GPS G05 2009-08-21弧段卫星轨道误差对比/mm

Table 6　Comparison of GPS G05 Satellite Orbit Error Between Integrated Approach and Ground-Station-Only on August 21, 2009/mm

方法	R	T	N	3D
一步法	0.893 3	0.775 9	1.214 1	1.695 3
地面站	0.403 3	0.979 0	3.564 6	3.718 5

3　结　语

本文介绍了一步法方法原理、算法设计思路和具体实现。基于观测模型统一表达、参数统一描述的思想,以MPI/OpenMP混合并行技术克服一步法的计算瓶颈,并以联合地基GPS观测、GRACE星载GPS观测、GRACE星间跟踪KBRR观测数据反演重力场、轨道、模糊度、钟差等参数为例进行了仿真研究。已有计算条件下,顾及卫星重力观测数据与重力场建模的广义一步法具备了大规模应用的基础。本文仿真实验表明,一步法解算的地球重力场模型的阶误差比同解法低,二阶项精度可以达到70%的改善效果,一步法综合了GRACE和GPS卫星的轨道特征,解算的二阶项所有系数均优于分步法;增加了GRACE的星载GNSS观测值后,一步法GPS卫星轨道精度与只用地面站的轨道精度相比总体有所改善,3D RMS平均提升约4.7%,其中地面跟踪时间短的弧段(约6 h),由于GRACE卫星数据的加入有效改善了观测几何结构,轨道3D RMS提升高达54%。这些结果初步说明了广义一步法在地球重力场恢复和卫星联合定轨中的重要作用,后续将继续开展使用一步法进行地球重力场、地心运动、地球自转等更多参数的联合反演及分析的相关工作。

参　考　文　献

[1] 姚宜斌, 杨元喜, 孙和平, 等. 大地测量学科发展现状与趋势[J]. 测绘学报, 2020, 49(10): 1243-1251.
YAO Yibin, YANG Yuanxi, SUN Heping, et al. Geodesy Discipline: Progress and Perspective[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(10): 1243-1251.

[2] International Association of Geodesy (IAG). Global Geodetic Observing System (GGOS) Geodetic Observations[EB/OL]. [2024-01-12]. https://ggos.org/obs/.

[3] ALTAMIMI Z, REBISCHUNG P, COLLILIEUX X, et al. ITRF2020: An Augmented Reference Frame Refining the Modeling of Nonlinear Station Motions[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(5): 47.

[4] KOENIG D. A Terrestrial Reference Frame Realised on the Observation Level Using a GPS-LEO Satellite Constellation[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(11): 1299-1312.

[5] GAMBIS D, RICHARD J Y, BIANCALE R, et al. Why Combining at the Observation Level ?[C]// Reference Frames for Applications in Geosciences. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 111-117.

[6] COULOT D, BERIO P, BIANCALE R, et al. Toward a Direct Combination of Space-Geodetic Techniques at the Measurement Level: Methodology and Main Issues[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B5): B05410.

[7] POLLET A, COULOT D, BIANCALE R, et al. GRGS Numerical Simulations for a GRASP-Like Mission[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(5): 45.

[8] DELVA P, ALTAMIMI Z, BLAZQUEZ A, et al. GENESIS: Co-location of Geodetic Techniques in Space[J]. *Earth, Planets and Space*, 2023, 75(1): 5.

[9] Strasser S. Reprocessing Multiple GNSS Constellations and a Global Station Network from 1994 to 2020 with the Raw Observation Approach[D]. Graz: Graz University of Technology, 2022.

[10] WANG J G, GE M R, GLASER S, et al. Improving VLBI Analysis by Tropospheric Ties in GNSS and VLBI Integrated Processing[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(4): 32.

[11] 宁津生, 王正涛, 超能芳. 国际新一代卫星重力探测计划研究现状与进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 1-8.
NING Jinsheng, WANG Zhengtao, CHAO Nengfang. Research Status and Progress in International Next-Generation Satellite Gravity Measurement Missions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 1-8.

[12] 罗志才, 钟波, 周浩, 等. 利用卫星重力测量确定地球重力场模型的进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1713-1727.
LUO Zhicai, ZHONG Bo, ZHOU Hao, et al. Progress in Determining the Earth's Gravity Field

Model by Satellite Gravimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1713-1727.

[13] ZHU S, REIGBER C, KÖNIG R. Integrated Adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS Data[J]. *Journal of Geodesy*, 2004, 78(1): 103-108.

[14] 肖云. 基于卫星跟踪卫星数据恢复地球重力场的研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2006.
XIAO Yun. Research on the Earth Gravity Field Recovery from Satellite-to-Satellite Tracking Data[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006.

[15] 闫志闯. GRACE卫星精密轨道确定与一步法恢复地球重力场[D]. 郑州:信息工程大学, 2015.
YAN Zhichuang. Precise Orbit Determination of GRACE Satellite and One-Step Recovery of Earth Gravity Field[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2015.

[16] 邹贤才, 衷路萍, 李建成. 卫星精密定轨与重力场建模的同解法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(7): 2413-2423.
ZOU Xiancai, ZHONG Luping, LI Jiancheng. Simultaneous Solution for Precise Satellite Orbit and Earth Gravity Model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(7): 2413-2423.

[17] 郭南男, 周旭华, 吴斌, 等. 联合星载GPS和KBRR星间测速数据反演GRACE时变重力场模型[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2568-2577.
GUO Nannan, ZHOU Xuhua, WU Bin, et al. A Model of the Time-Variable Gravity Field Inverted from Combined GRACE On-Board GPS and KBR Range Rate Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(7): 2568-2577.

[18] KÖNIG R, REIGBER C, ZHU S Y. Dynamic Model Orbits and Earth System Parameters from Combined GPS and LEO Data[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(3): 431-437.

[19] 邹贤才. 卫星轨道理论与地球重力场模型的确定[D]. 武汉:武汉大学, 2007.
ZOU Xiancai. Theory of Satellite Orbit and Earth Gravity Field Determination[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007.

[20] 王庆宾. 动力法反演地球重力场模型研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2009.
WANG Qingbin. Study on Inversion of Earth Gravity Field Model by Dynamic Method[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2009.

[21] 邹贤才, 李建成, 汪海洪, 等. OpenMP并行计算在卫星重力数据处理中的应用[J]. 测绘学报, 2010, 39(6): 636-641.
ZOU Xiancai, LI Jiancheng, WANG Haihong, et al. Application of Parallel Computing with OpenMP in Data Processing for Satellite Gravity[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(6): 636-641.

[22] 潘娟霞. GOCE卫星重力梯度内部校准及重力场确定[D]. 武汉:武汉大学, 2021.
PAN Juanxia. Internal Calibration of GOCE Gravity Gradient and Determination of the Earth's Gravity Field[D]. Wuhan: Wuhan University, 2021.

[23] 衷路萍. 利用SLR确定地心运动及地球低阶时变重力场的关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学, 2022.
ZHONG Luping. Research on Determination of Geocenter Motion and Low-degree Time-variable Earth Gravity Field Model using SLR[D]. Wuhan: Wuhan University, 2022.

[24] JOHNSTON G, RIDDELL A, HAUSLER G. The International GNSS Service[M]//Teunissen P J G, Montenbruck O. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 967-982.

[25] FOERSTE C, BRUINSMA S L, ABRIKOSOV O, et al. EIGEN-6C4—The Latest Combined Global Gravity Field Model Including GOCE Data Up to Degree and Order 2 190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse[EB/OL]. (2015-11-01)[2024-03-22]. https://doi.org/10.5880/icgem.2015.1.

[26] IERS Conventions Centre. IERS Conventions (2010)[M]. GÉRARD P, BRIAN L, eds. IERS Technical Note No. 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010: 179.

[27] DOBSLAW H, FLECHTNER F, BERGMANN-WOLF I, et al. Simulating High-Frequency Atmosphere-Ocean Mass Variability for Dealiasing of Satellite Gravity Observations: AOD1B RL05[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(7): 3704-3711.

[28] ARNOLD D, MEINDL M, BEUTLER G, et al. CODE's New Solar Radiation Pressure Model for GNSS Orbit Determination[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(8): 775-791.

[29] ALTAMIMI Z, REBISCHUNG P, MÉTIVIER L, et al. ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(8): 6109-6131.

[30] SEO K W, WILSON C R, CHEN J L, et al. GRACE's Spatial Aliasing Error[J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 172(1): 41-48.

[31] CHENG M K, RIES J. The Unexpected Signal in GRACE Estimates of C_{20}[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(8): 897-914.