



# 多分析中心站坐标产品的综合方法研究

陈国<sup>1</sup> 魏娜<sup>1</sup> 赵齐乐<sup>1</sup> 蔡洪亮<sup>2</sup> 徐天河<sup>3</sup>

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北武汉,430079

2 北京跟踪与通信技术研究所,北京,100094

3 山东大学(威海)空间科学研究院,山东威海,264209

**摘要:**首先介绍了多分析中心产品融合处理的两种综合策略,然后基于解层面的综合策略,提出了站坐标和地球自转参数同时综合的方法。采用国际GNSS服务组织(International GNSS Service,IGS)9个分析中心1a的数据进行试验,从站坐标、地球自转参数精度以及地心运动3个方面验证了该方法的正确性。结果表明,基于综合方法得到的综合解和IGS综合解处于同一精度水平。站坐标在平面和高程方向的一致性分别为0.5 mm和1.0 mm,极移和极移速率的一致性分别优于 $7.0 \times 10^{-6}''$ 和 $40.0 \times 10^{-6}''/d$ ,日长参数优于 $7.7 \times 10^{-6} s/d$ 。所提出的综合方法可用于全球连续监测评估系统(international GNSS monitoring and assessment system,iGMAS)的站坐标/地球自转参数产品综合。

**关键词:**站坐标;地球自转参数;地心运动;IGS;iGMAS;产品综合

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

随着卫星导航技术的不断发展,国际上越来越多的机构可以提供高精度的卫星导航技术产品,如测站坐标、精密轨道、钟差、地球自转参数(earth rotation parameter,ERP)和对流层延迟等产品<sup>[1-2]</sup>。作为GNSS技术相关的核心产品,站坐标和地球自转参数的精度直接影响相应参考框架的精度,从而影响基于该参考框架的其他产品质量<sup>[3]</sup>。

国际GNSS服务组织(International GNSS Service,IGS)的分析中心协调机构负责对各单位提交的站坐标/地球自转参数天解产品进行综合处理,能够得到测站数更多、结果更稳健的综合解。处理多期站坐标/地球自转参数综合解可获取指定参考历元的测站位置和速度及与其自洽的地球自转参数序列,并与其他技术产品共同作为国际地球参考框架的输入<sup>[4-7]</sup>。

为服务于北斗卫星导航系统,兼顾其他全球导航系统的监测评估,中国于2007年提出全球连续监测评估系统(international GNSS monitoring and assessment system,iGMAS)的设想<sup>[8]</sup>,经过多年建设,目前已有10余家机构向iGMAS提交各类与GNSS技术相关的精密产品。产品综合

与服务中心作为iGMAS的产品再处理中心,其中一个很重要的功能是负责生成并发布站坐标和ERP综合产品。因此,研究稳健可靠的站坐标产品综合方法十分迫切。

基于此,本文首先分析了多源产品的各种综合策略及其特点,然后重点研究了GNSS站坐标/地球自转参数产品的融合处理,提出了一种站坐标/地球自转参数的综合方法,采用1a的IGS产品验证了该方法的可行性,为iGMAS站坐标/地球自转参数产品综合奠定了基础。

## 1 多源产品的综合处理

产品综合是指对多种技术产品或者同一技术的多分析中心产品进行融合处理,以便充分利用多源(不同技术或者不同分析中心)产品的各自优势,获得最稳定可靠的综合解。产品综合主要有3种策略:基于观测值层面的综合、基于法方程层面的综合和基于解层面的综合。基于观测值层面的综合主要针对多种观测技术,如GNSS和惯导之间的紧组合,它采用统一的数学模型和协议模型,完整地利用不同观测值之间的方差协

收稿日期:2018-07-14

项目资助:国家自然科学基金(41774035, 41774007, 41674004, 41574027)。

第一作者:陈国,博士,主要研究方向为GNSS导航性能评估。guo\_chen@whu.edu.cn

通讯作者:魏娜,博士,副教授。nwei@whu.edu.cn

方差信息,得到的参数估计解理论最严密。对于同一技术的多分析中心产品并不存在观测值层面的综合,因此,本文主要介绍基于法方程层面的综合和基于解层面的综合两种策略。

### 1.1 基于法方程层面的综合

根据  $n$  批次独立观测量,建立相应的观测方程并进行最小二乘处理,得到  $n$  个独立法方程:

$$N_i x_i = W_i \quad (1)$$

则可以将综合的法方程表示为:

$$N_c x_c = W_c \quad (2)$$

式中,  $N_i$ 、 $x_i$  和  $W_i$  分别为第  $i$  次观测量形成的法方程信息矩阵、待估参数和右矩阵;  $N_c = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} N_i$ ;

$W_c = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} W_i$ ;  $\sigma_i^2$  为第  $i$  个法方程对应的方差因子;  $x_c$  为参数的综合解。

基于法方程层面的综合是对基于观测值层面综合的一种近似,其前提条件是各个法方程没有引入额外的基准约束条件,否则不同法方程之间可能存在基准不一致的问题。以 GNSS 全球观测网为例,如果各个法方程的建立是基于各自的基准,将导致综合的法方程受到单个法方程基准约束的影响,最终导致总法方程存在内部网形结构扭曲、无法明确参数估计结果所在框架等问题。因此,基于法方程层面的综合一般需要先对单个法方程进行先验约束消除来得到无基准的法方程,然后进行法方程叠加并附加约束条件,最终得到基于法方程层面的综合解。但 IGS 分析中心数据处理中往往附加了很多不可消除的约束,因此很难获得无基准的法方程。

### 1.2 基于解层面的综合

基于解层面的综合是将不同批次的参数估计解重新作为虚拟观测值,得到观测方程及随机模型,即:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \vdots \\ \hat{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ E \\ \vdots \\ E \end{bmatrix} x_c + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}, D = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} P_1^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_2^{-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P_n^{-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $E$  为单位阵或变换阵;  $\hat{x}_i$ 、 $v_i$  和  $P_i$  分别为虚拟观测值、观测误差和权阵;  $D$  为观测值方差-协方差阵。考虑到不同批次/子网解的算法存在差异,各批次的解可能暗含不同的基准,如果不考虑基准差异,得到的综合解基准将为所有批次解的平均基准。为了消除不同解的基准差异,通常的做法是采用时空基准变换条件,在观测量与综

合解之间建立变换方程<sup>[9]</sup>,获得对齐到指定基准的综合解,此时  $E$  为相应的变换矩阵。

在 3 种综合策略中,基于解层面的综合相对来说是最灵活的综合方法,可以理解为对不同批次参数解的二次估计。考虑到具体 GNSS 观测网形成的法方程系统,利用分析中心提供的先验信息进行先验约束消除,依旧会残留一些基准约束信息<sup>[10]</sup>,此时采用基于法方程的综合方法并不适合。采用相似变换方法可以很好地消除由基准约束带来的系统误差影响。基于解层面的综合策略可以充分考虑各个分析中心观测数据的方差-协方差信息,从而提高综合结果的可靠性。

## 2 站坐标/地球自转参数综合方法

为了便于对不同机构不同技术的定位定轨结果进行联合处理,IGS 提出了与解无关的文件交换格式 (solution independent exchange format, SINEX)<sup>[11]</sup>,该文件一般包括站坐标、地球自转参数等估计值和先验值以及相应的先验约束信息和后验方差-协方差信息等,通过这些信息可以恢复法方程。

### 2.1 站坐标/地球自转参数的综合模型

本文采用基于解层面的综合策略,利用如下观测模型同时对站坐标和地球自转参数产品进行综合<sup>[10,12]</sup>:

$$X^s + v^s = X^c + T^s + R^s \theta^s + D^s X^c \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_p^s + v_{xp}^s = x_p^c + \theta_x^s \\ y_p^s + v_{yp}^s = y_p^c + \theta_y^s \\ \dot{x}_p^s + v_{\dot{x}p}^s = \dot{x}_p^c \\ \dot{y}_p^s + v_{\dot{y}p}^s = \dot{y}_p^c \\ u^s + v_u^s = u^c \end{cases} \quad (5)$$

其中,

$$R^s = \begin{bmatrix} 0 & -Z^c & Y^c \\ Z^c & 0 & -X^c \\ -Y^c & X^c & 0 \end{bmatrix}, \theta^s = \begin{bmatrix} \theta_x^s \\ \theta_y^s \\ \theta_z^s \end{bmatrix}$$

式中,分析中心参数解上标为  $s$ ,包括测站站坐标  $X$ 、极移  $x_p$  和  $y_p$ 、极移速率  $\dot{x}_p$  和  $\dot{y}_p$ 、日长变化参数  $u$ ; 相应的综合解上标为  $c$ ;  $T^s = [T_x \ T_y \ T_z]^T$  为 3 个平移参数构成的向量;  $\theta^s = [\theta_x^s \ \theta_y^s \ \theta_z^s]^T$  为旋转参数组成的向量;  $R^s$  为旋转矩阵;  $D^s$  为尺度参数;  $v$  为相应的观测误差。

通过建立上述观测方程,可以有效地消除不同分析中心站坐标和地球自转参数之间的系统误差,使得综合解不受这些系统误差的影响<sup>[12]</sup>。理论上极移速率与参考框架间的关系应由式(5)

的前两式求导得到,相关文献指出,考虑到分析中心在估计地球自转参数时采用的模型,地球自转参数速率与参考框架转换参数随时间的变化实际上并无直接关系<sup>[7]</sup>,因此在进行站坐标/地球自转参数综合时,不需要估计旋转参数随时间的变化。

### 2.2 综合处理流程

本文对多分析中心 GNSS 站坐标/地球自转参数产品进行综合处理,流程如图 1 所示。

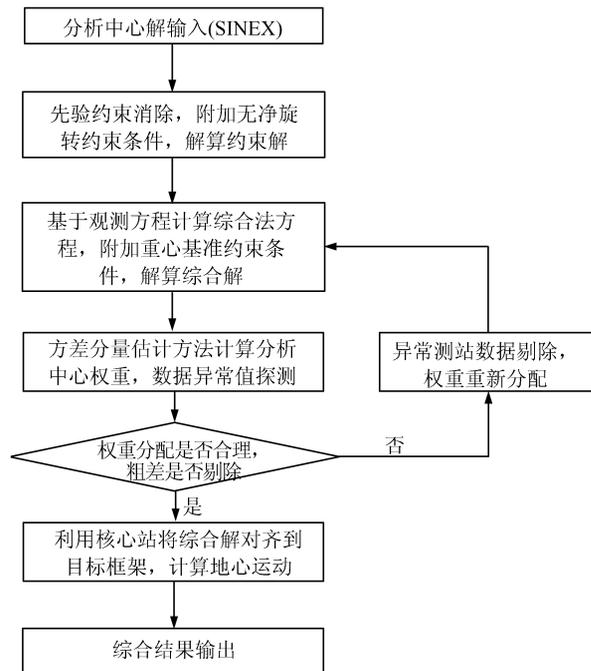


图 1 分析中心站坐标/地球自转参数综合处理流程  
Fig.1 Combination Flowchart of Station Coordinates and Earth Rotation Parameters for Analysis Centers

首先采用式(6)消除分析中心解的先验约束,该先验约束由分析中心提供并存储在 SINEX 文件中。

$$\begin{cases} N_f = Q^{-1} - Q_0^{-1} \\ W_f = Q^{-1}X - Q_0^{-1}X_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $N_f$  和  $W_f$  分别为无约束的法方程的信息矩阵和右向量;  $Q$  和  $Q_0$  分别为参数的后验方差-协方差阵和先验信息;  $X$  和  $X_0$  分别为参数的估计值和先验值。

然后对无约束的法方程附加最小约束条件。考虑到卫星动力学的约束,GNSS 技术对地心和尺度较为敏感,只需要增加定向的基准约束,即参数解与目标框架解的无净旋转约束条件(no net rotation, NNR),当最小约束的方差信息为  $\Sigma_0$  时,有:

$$B(X_c - X_0) = 0 \quad (7)$$

式中,  $B = [(R^s)^T R^s]^{-1} (R^s)^T$  包括地球参考系基准定义所需的定向基准信息,  $R^s$  为相应的旋转矩阵;  $X_c$  为站坐标和地球自转参数综合解;  $X_0$  为测站的先验坐标。

将式(7)生成的法方程和  $N_f$  进行叠加,得到附加约束之后的法方程:

$$(N_f + B^T \Sigma_0^{-1} B) X_c = W_f + (B^T \Sigma_0^{-1} B) X_0 \quad (8)$$

通过解算式(8)即可得到附加约束之后的分析中心约束解。利用式(4)和式(5)建立分析中心约束解与综合解的观测模型,计算综合法方程,待估计的参数包括综合站坐标、地球自转参数和转换参数。由于综合法方程秩亏,需要对综合法方程附加基准约束,才能实现综合站坐标/地球自转参数的求解。本文采用重心基准约束,设  $p_j^s$  为与某分析中心  $s$  相关的 7 个转换参数中任意一个,则可以建立 7 个约束方程:

$$\sum_{s=1}^n \frac{p_j^s}{\sigma_s^2} = 0 \quad (9)$$

式中,  $n$  为分析中心个数;  $\sigma_s$  为分析中心  $s$  对应的中误差,初始值为 1。

通过迭代计算,剔除分析中心的粗差数据,同时采用方差分量估计方法<sup>[13-14]</sup>来确定分析中心的权重,加权得到综合解。本文采用简化的赫尔默特方差分量公式估计各分析中心的方差因子,具体计算公式如下:

$$(\sigma_s^{i+1})^2 = (\sigma_s^i)^2 \times \frac{(v^s)^T (Q_c^s)^{-1} v^s}{f_s} \quad (10)$$

其中,

$$f_s = n_s - \text{tr}(N^{-1}N^s)$$

式中,  $v^s$ 、 $Q_c^s$  和  $n_s$  分别为分析中心观测值的残差、方差-协方差阵和观测值个数;  $N$  和  $N^s$  分别为综合法方程和分析中心法方程的信息矩阵;  $\sigma_s^i$  为第  $i$  次平差之后的观测值中误差;  $\text{tr}(\cdot)$  为迹运算函数。通过多次迭代可剔除异常观测数据,并最终确定各个分析中心的方差因子。

为了使得综合产品统一到指定的参考框架,通常采用一定数量的测站,将综合解对齐到指定参考框架。为了与 IGS 框架保持一致,本文采用 IGS 提供的核心站(ftp://igs.org/pub/station/coord/IGb08\_core.txt)将综合解对齐到 IGB08 框架<sup>[15]</sup>。由于此时没有对综合解附加外部的基准约束,可以认为综合解的原点是基于整个地球质量中心,所以综合解与 IGB08 框架间的平移参数即为地心运动,这种获得地心运动的方法即为网平移法。但该方法容易受数据处理模型和地面

网形的影响<sup>[16-17]</sup>,因此严格来说,利用网平移法得到的地心运动为似地心运动。

### 3 试验验证和分析

目前共有9个分析中心(COD、EMR、ESA、GFZ、GRG、JPL、MIT、NGS和SIO)向IGS提供最终的站坐标/地球自转参数产品。本文采用这些分析中心提供的站坐标天解文件,时间跨度为2015-01-04—2015-12-26,利用§2所述的综合策略进行站坐标/地球自转参数产品的综合测试。每个分析中心的SINEX文件包含未知参数的个数不一样,但都含有站坐标和地球自转参数。除了GRG和SIO两个分析中心,其他分析中心还含有卫星天线相位中心偏差参数,在数据处理中需要对这些不感兴趣的参数进行消参处理。对于分析中心处理的测站数,MIT解算的测站数最多,为350个左右,而EMR仅解算了80个左右的测站坐标。

IGS分析中心提供的站坐标产品所采用的先验约束不同,因此对各分析中心进行先验约束消除和附加最小约束的处理流程也不同。以本文所采用的2015年产品为例,COD和ESA提供的是已经去掉约束的信息矩阵,不需要对其进行去约束处理,直接附加NNR约束即可;GFZ和JPL提供的是相关系数矩阵,需要先将其转换为方差-协方差阵,其他分析中心提供的则是方差-协方差矩阵信息。对这些分析中心而言,首先利用式(6)消除先验约束,再利用式(8)统一附加最小约束。另外,EMR和NGS提供的是附加NNR最小约束的解。

#### 3.1 站坐标综合结果

图2给出了各分析中心及本文综合结果相对IGS的均方根误差(root mean square, RMS),本文综合解标记为CCC。在精度统计中,采用3倍中误差作为阈值,剔除个别残差较大的测站,无论是分析中心解还是综合解,平均每天剔除的测站数在4个以内。表1给出了分析中心解和本文综合解东方向、北方向和高程方向的精度统计结果(RMS均值)。

从图2和表1可以看出,分析中心GRG的站坐标产品精度明显比其他分析中心的精度差,尤其是北方向和高程方向;NGS和SIO站坐标产品在东方向的精度比其他分析中心稍差;除GRG、NGS和SIO以外的其他分析中心的站坐标精度基本相当,东、北、高程3个方向的平均精度分别

为1.1 mm、1.2 mm和3.2 mm。本文综合解与IGS解的单方向一致性优于1 mm,在东、北、高程3个方向的精度分别为0.3 mm、0.4 mm和1.0 mm。

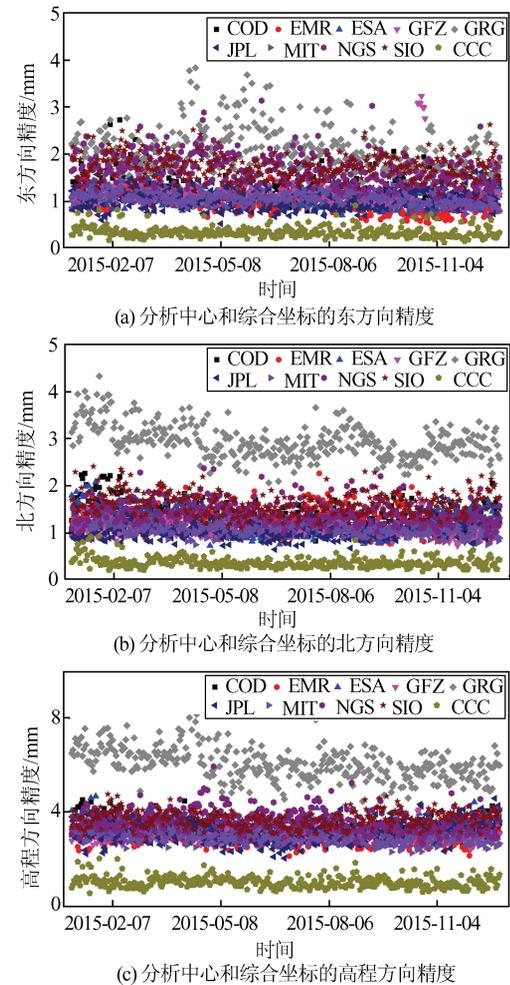


图2 分析中心解和综合解的精度序列

Fig.2 Precision Series of Station Coordinate Solutions Derived from Analysis Centers and Combination

表1 分析中心解及综合解的精度统计/mm

分析中心	东方向	北方向	高程方向
COD	1.2	1.4	3.3
EMR	1.0	1.3	3.0
ESA	1.0	1.2	3.4
GFZ	1.2	1.1	3.1
GRG	2.2	3.0	6.1
JPL	1.1	1.1	3.2
MIT	1.1	1.1	2.9
NGS	1.7	1.4	3.7
SIO	1.7	1.6	3.7
CCC	0.3	0.4	1.0

赫尔默特方差分量估计是对不同精度的观测数据进行统一处理的有效工具。如图3所示,

各分析中心的方差因子在测试时间段内基本稳定,但方差因子在分析中心之间差异较大。其中,NGS的方差因子最大,均值在 1 000 左右,可见 NGS 天解提供的先验精度过于理想;COD 天解的方差因子最小,在 0.000 1 左右(由于数值太小,图 3 中未显示),其余分析中心的方差因子均值在 2~20 之间。通过对分析中心方差因子的调整,可以合理地确定各分析中心观测数据的权重,确保综合结果的可靠性。

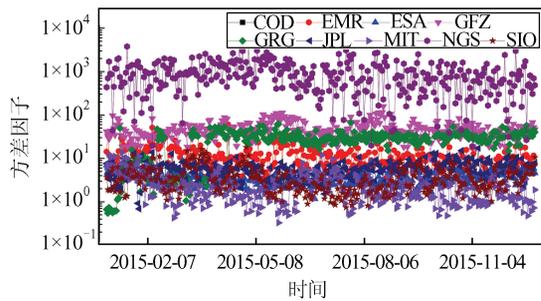


图 3 分析中心解的方差因子

Fig.3 Variance Factors of Analysis Centers Solutions

### 3.2 地球自转参数综合结果

本文采用紧组合方式对站坐标和地球自转参数同时进行综合,可以保证站坐标和地球自转参数综合解之间的一致性。地球自转参数综合解相对于 IGS 的残差均值及 RMS 的统计结果见表 2。

由表 2 可知,相对于 IGS 综合解,所有分析中心的极移精度在  $50 \times 10^{-6}''$  以内,多数分析中心的极移精度在  $30 \times 10^{-6}''$  以内。所有分析中心极移速率精度在  $200 \times 10^{-6}''/d$  以内,其中 MIT 的极移及极移速率精度最好,X 极移为  $14.7 \times 10^{-6}''$ ,Y 极移精度为  $12.9 \times 10^{-6}''$ ,极移速率精度分别为  $77.1 \times 10^{-6}''/d$  和  $79.9 \times 10^{-6}''/d$ 。对于日长参数,所有分析中心相对于 IGS 解都存在明显的负向偏差,若扣除该偏差影响,所有分析中心日长参数的精度在  $30 \times 10^{-6} s/d$  以内,多数分析中心的精度优于  $20 \times 10^{-6} s/d$ 。本文地球自转参数的综合结果与 IGS 解符合较好,极移精度在  $7 \times 10^{-6}''$  以内,极移速率精度在  $40 \times 10^{-6}''/d$  以内,扣除偏差的日长参数精度为  $7.7 \times 10^{-6} s/d$ 。

表 2 分析中心和本文综合解的地球自转参数精度

Tab.2 Statistic Results of Earth Rotation Parameter for Solutions Derived from Analysis Centers and Combination

分析中心	X 极移/ $10^{-6}''$		Y 极移/ $10^{-6}''$		X 极移速率/ ( $10^{-6}'' \cdot d^{-1}$ )		Y 极移速率/ ( $10^{-6}'' \cdot d^{-1}$ )		日长参数/ ( $10^{-6} s \cdot d^{-1}$ )	
	偏差均值	RMS	偏差均值	RMS	偏差均值	RMS	偏差均值	RMS	偏差均值	RMS
COD	14.0	30.1	4.0	19.5	-75.2	124.5	-21.4	153.5	-15.9	18.2
EMR	-20.0	38.8	-9.9	31.7	-59.0	161.2	-93.0	156.8	-41.4	46.8
ESA	-1.8	18.0	3.1	15.2	-64.4	103.5	-15.0	119.2	-21.8	24.1
GFZ	12.7	28.3	5.7	25.9	-65.0	136.1	69.6	180.6	-18.7	21.0
GRG	-4.6	29.2	-7.5	30.5	15.7	164.0	45.5	160.3	-38.3	43.2
JPL	-5.4	19.2	11.9	21.4	-76.7	133.3	-42.3	105.4	-36.0	39.1
MIT	0.3	14.7	0.1	12.9	59.2	77.1	11.6	79.9	-24.1	24.8
NGS	3.1	40.9	12.3	35.2	-16.6	160.6	5.9	152.7	-13.4	15.6
SIO	-4.9	25.3	-16.0	28.1	113.1	170.6	-6.5	133.8	-62.4	66.3
CCC	1.2	6.5	3.3	6.7	-18.8	33.1	7.7	35.1	-14.0	16.0

### 3.3 地心运动

图 4 给出了本文解算的地心运动和 IGS 提供的地心运动时间序列,分别用 CCC 和 IGS 表示。由图 4 可知,本文解算的地心运动结果与 IGS 结果总体上一致。但两者在 Z 方向上存在约 3 mm 的偏差,尤其是从 2015-02-22 开始,本文解算的地心运动参数和 IGS 之间存在较明显的跳变。其原因是 IGS 认为分析中心解都是基于同样的天线相位模型和物理参数,不同分析中心产品暗含的尺度基准应一致,所以在建立观测方程(式(5))时,默认分析中心解与综合解之间的尺度参数为零<sup>[10]</sup>,而本文在建立观测方程时仍然考虑了尺度参数。

此外,对于 Z 方向的地心运动,无论是本文结果还是 IGS 解,都存在周期约 72 d 和 51 d 的信号,与 GPS 交点年周期性误差(基频为每年 1.04 周)的频谱一致,即第 5 个和第 7 个频谱。由此推测,Z 方向地心运动的两个异常周期频谱是由 GPS 交点年误差引起的,与已有文献的研究一致<sup>[18]</sup>。而且部分分析中心(COD、ESA、GRG)在进行精密定位定轨时还加入了 GLONASS 数据,GLONASS 的轨道面分布有别于 GPS,同时其较高的轨道倾角使得相应的光压模型对 Z 方向的地心运动影响更为显著<sup>[19-20]</sup>。GLONASS 观测数据在参与地心运动估计时,对其卫星光压模型的精

化仍值得进一步研究。

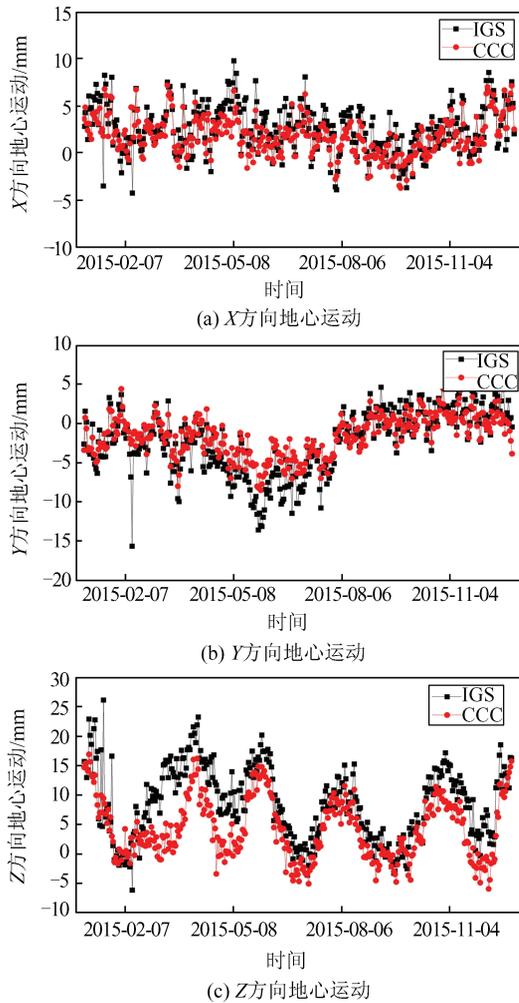


图4 本文综合解的地心运动

Fig.4 Geocenter Motions of Combination Solution in This Study

需要注意的是,考虑到GNSS估计地心运动的局限,如需要估计太阳光压、钟差、对流层延迟等和地心运动尤其是Z方向分量有较强相关性的参数,目前利用GNSS技术获得的地心运动结果相对卫星激光测距解来说并不可靠<sup>[21]</sup>,后续研究将考虑如何降低GNSS待估参数的相关性。

## 4 结 语

本文提出的站坐标/地球自转参数产品综合方法顾及了站坐标和地球自转参数的一致性,采用赫尔默特方差分量估计方法合理确定了不同分析中心产品的权重。以IGS分析中心站坐标/地球自转参数产品为试验数据,结果表明本文综合解和IGS符合较好。坐标符合精度在平面和高程方向分别可达到0.5 mm和1 mm,极移、极移

速率和日长参数的符合精度分别为 $7 \times 10^{-6}''$ 、 $40 \times 10^{-6}''/d$ 和 $7.7 \times 10^{-6} s/d$ ,两者地心运动参数的变化趋势和频谱特性一致。本文综合方法可以作为iGMAS站坐标/地球自转参数产品综合和评估的理论参考。

## 参 考 文 献

- [1] Dow J M, Neilan R E, Gendt G. The International GPS Service: Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(3): 320-326
- [2] Beutler G, Moore A, Mueller I. The International Global Navigation Satellite Systems Service (IGS): Development and Achievements[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3-4): 297-307
- [3] Wei Na, Shi Chuang, Li Min, et al. Analysis and Assessments of IGS Products Consistencies [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1 363-1 367(魏娜,施闯,李敏,等. IGS产品的一致性分析及评价[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(11): 1 363-1 367)
- [4] Rebischung P, Garayt B. Recent Results from the IGS Terrestrial Frame Combinations[J]. *International Association of Geodesy Symposia*, 2013, 138(1): 69-74
- [5] Altamimi Z, Sillard P, Boucher C. ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 107(B10): 1-19
- [6] Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J, et al. ITRF2005: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Based on Time Series of Station Positions and Earth Orientation Parameters [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112 (B9401): 401-419
- [7] Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L. ITRF2008: An Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85 (8): 457-473
- [8] Jiao Wenhai. New Development of International GNSS Monitoring and Assessment System[C]. The 2nd Congress of China Geodesy and Geophysics, Nanjing, China, 2016(焦文海. 国际GNSS监测评估系统(iGMAS)新进展[C]. 第二届中国大地测量与地球物理学学术大会,南京,2016)
- [9] Yao Yibin. Research on the Algorithm and Realization of Post-Processing for GPS Precise Positioning and Orbit Determination[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004(姚宜斌. GPS精密定位定轨后处理算法与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2004)

- [10] Rebischung P, Altamimi Z, Ray J, et al. The IGS Contribution to ITRF2014[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(7): 1-20
- [11] Kouba J. SINEX Format Version[OL]. [http://hpiers.obspm.fr/combinaison/documentation/articles/sinex\\_v210\\_proposal.pdf](http://hpiers.obspm.fr/combinaison/documentation/articles/sinex_v210_proposal.pdf), 1995
- [12] Shi Chuang, Zou Rong, Yao Yibin, et al. Systematic Error Analysis in Data Combination Based on SINEX Solution[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(6): 608-611(施闯, 邹蓉, 姚宜斌, 等. 基于 SINEX 解的数据组合及系统误差分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2008, 33(6): 608-611)
- [13] Searle S R. An Overview of Variance Component Estimation[J]. *Metrika*, 1995, 42(1): 215-230
- [14] Teunissen P J, Amiri-Simkooei A R. Least-Squares Variance Component Estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(2): 65-82
- [15] Rebischung P, Griffiths J, Ray J, et al. IGS08: The IGS Realization of ITRF2008[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(4): 483-494
- [16] Collilieux X, van Dam T, Ray J, et al. Strategies to Mitigate Aliasing of Loading Signals While Estimating GPS Frame Parameters[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(1): 1-14
- [17] Wei Na, Shi Chuang, Liu Jingnan. Effects of Surface Loading and Heterogeneous GPS Network on Helmert Transformation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(2): 484-493
- [18] Collilieux X, van Dam T. Anomalous Harmonics in the Spectra of GPS Position Estimates[J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(1): 55-64
- [19] Meindl M, Beutler G, Thaller D, et al. Geocenter Coordinates Estimated from GNSS Data as Viewed by Perturbation Theory[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(7): 1 047-1 064
- [20] Scaramuzza S, Dach R, Beutler G, et al. Dependency of Geodynamic Parameters on the GNSS Constellation[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 92(1): 1 047-1 059
- [21] Dong D, Yunck T, Hefflin M. Origin of the International Terrestrial Reference Frame[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B4): 2 200-2 210

## Research on the Combination of Station Coordinate Products Derived from Multiple Analysis Centers

CHEN Guo<sup>1</sup> WEI Na<sup>1</sup> ZHAO Qile<sup>1</sup> CAI Hongliang<sup>2</sup> XU Tianhe<sup>3</sup>

<sup>1</sup> GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>2</sup> Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China

<sup>3</sup> Institute of Space Science, Shandong University (Weihai), Weihai 264209, China

**Abstract:** This paper first gives a summarization of different combination strategies, and then the combination strategy for station coordinates and earth rotation parameters (ERP) based on solution level is introduced. The one-year products from nine analysis centers of International GNSS Service (IGS) are used to validate the combination method. As far as the differences between the combined solutions and the results of IGS are concerned, the combined coordinates, ERP and geocenter motion parameters show well agreement with IGS combination. The agreement of coordinate is 0.5 mm and 1.0 mm for horizontal and vertical, respectively. While the precision of pole motion and its rate are respectively about  $7.0 \times 10^{-6}''$  and  $40.0 \times 10^{-6}''/d$ , and the precision of length of day (LOD) parameter is better than  $7.7 \times 10^{-6} s/d$ . The implemented program of station coordinates and ERP combination will be helpful for the international GNSS monitoring and assessment system (iGMAS) products combination.

**Key words:** station coordinate; earth rotation parameter; geocenter motion; IGS; iGMAS; product combination

**First author:** CHEN Guo, PhD, specializes in performance assessment of GNSS navigation. E-mail: guo\_chen@whu.edu.cn

**Corresponding author:** WEI Na, PhD, associate professor. E-mail: nwei@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41774035, 41774007, 41674004, 41574027.