

文章编号:1671-8860(2005)08-0739-05

文献标志码:A

基于 SINEX 文件的 ERP 参数估计

姚宜斌¹ 刘经南^{2,3} 陶本藻¹ 施 闻³

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路129号,430079)

(2 武汉大学校长办公室,武汉市珞珈山,430072)

(3 武汉大学GPS工程研究中心,武汉市珞喻路129号,430079)

摘要:利用IGS所发布的对GPS全球站处理后形成的单天解SINEX文件,通过参数转换和附有限制条件的间接平差两种不同的思路,详细推导了ERP参数的估计方法。并给出了利用自编程序估计的结果与IERS所发布的结果的比较,发现单纯利用GPS观测结果进行ERP参数的估计可能存在残留的系统性偏差。

关键词:ERP参数;参数转换;系统偏差

中图法分类号:P228.41

地球在空间的定向由三种运动来描述:一是地轴方向相对于空间的变化,该变化的周期部分称为章动,长期部分称为岁差;二是地轴方向相对于地球本体的变化,称为极移;三是地球绕地轴自转速度的变化,称为地球自转速度变化或日长变化。在广义上,对上述三种地球自转运动作定量描述的参数,称为地球定向参数EOP(earth orientation parameter)。在狭义上,只把描述地球自转速度变化的UT1(已加极移改正的世界时)和描述极移的地极坐标(x_p, y_p)称为地球自转参数ERP(earth rotation parameter)。因此,EOP等于ERP加上岁差和章动。

近年来, GPS测定地球自转参数从提高观测精度转向提高时间分辨率,它与VLBI或SLR相比,有着不可估量的作用。利用GPS观测值,可以求出日长的变化和极移值(x_p, y_p)。IGS及其数据处理中心参与国际地球自转服务IERS的全球坐标参考系维护及地球自转参数的发布。目前,中国在此领域的主要研究机构上海天文台利用VLBI技术获得的EOP精度优于±0.3 mas。

本文着重研究利用IGS所发布的GPS处理结果SINEX文件进行ERP参数估计的方法。对于基于SINEX文件的ERP参数估计的算法实现,需要用到参数转换的方法。

1 参数转换方法原理

参数转换也可理解为“重新参数化”或“参数重构”。其实质是按照需要,将待估参数表示成新参数的某种线性函数,并通过线性计算,将旧参数所对应的法方程系统转换为新参数所对应的法方程系统,通过解算新的法方程,得到新的待估参数值。

设有误差方程:

$$\mathbf{v} = \mathbf{B}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \quad (1)$$

其法方程为:

$$\mathbf{N}\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{N} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}$, $\mathbf{b} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$ 。

可将该法方程转换为以新的参数 $\tilde{\mathbf{x}}$ 表示的形式。设新参数 $\tilde{\mathbf{x}}$ 和旧参数 \mathbf{x} 之间存在如下的转换关系:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{d}\mathbf{x} \quad (3)$$

式(3)即参数转换方程,则相应的误差方程式(1)可写为:

$$\mathbf{v} = \mathbf{B}\mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}} - (\mathbf{l} - \mathbf{B}\mathbf{d}\mathbf{x}) \quad (4)$$

相应的法方程为:

$$\mathbf{C}^T \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{C}^T \mathbf{B}^T \mathbf{P} (\mathbf{l} - \mathbf{B}\mathbf{d}\mathbf{x}) \quad (5)$$

令 $\tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{C}^T \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} = \mathbf{C}^T \mathbf{N} \mathbf{C}$, $\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{C}^T \mathbf{B}^T \mathbf{P} (\mathbf{l} - \mathbf{B}\mathbf{d}\mathbf{x}) = \mathbf{C}^T (\mathbf{b} - \mathbf{N}\mathbf{d}\mathbf{x})$, 则有:

$$\tilde{\mathbf{N}}\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{b}} \quad (6)$$

经过参数转换,新的法方程系统所对应的未知参数为 $\tilde{\mathbf{x}}$ 。

法方程叠加的过程也可通过参数转换的思想予以解释。假设为了确定共同的参数 \mathbf{x}_c ,进行了 m 个独立的最小二乘处理,每个独立解 $\hat{\mathbf{x}}_i$ ($i=1, 2, \dots, m$) 可由下列法方程得出:

$$\mathbf{B}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{B}_i \hat{\mathbf{x}}_i = \mathbf{B}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{l}_i \quad (7)$$

$\hat{\mathbf{x}}_i$ 通过解法方程可以估计出参数,以矩阵形式表示如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{B}_1 & & \\ & \ddots & \\ 0 & & \mathbf{B}_m^T \mathbf{P}_m \mathbf{B}_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_1 \\ \hat{\mathbf{x}}_2 \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{l}_1 \\ \mathbf{B}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{l}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{B}_m^T \mathbf{P}_m \mathbf{l}_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于每个独立解 $\hat{\mathbf{x}}_i$ 在最终的解中可统一为 \mathbf{x}_c ,在将 $\hat{\mathbf{x}}_i$ 视为 \mathbf{x}_c 的虚拟观测值时,有形如 $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}$ 的参数转换方程如下:

$$[\hat{\mathbf{x}}_1 \ \hat{\mathbf{x}}_2 \ \cdots \ \hat{\mathbf{x}}_m]^T \cdot [\mathbf{I} \ \mathbf{I} \ \cdots \ \mathbf{I}]^T = \mathbf{x}_c \quad (9)$$

式中, \mathbf{I} 为单位阵,其阶数与 $\hat{\mathbf{x}}_i$ 的行数一致。则组合后的法方程为:

$$\tilde{\mathbf{N}}\tilde{\mathbf{x}}_c = \tilde{\mathbf{b}} \quad (10)$$

其中, $\tilde{\mathbf{N}} = \sum_{i=1}^m \mathbf{B}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{B}_i$; $\tilde{\mathbf{b}} = \sum_{i=1}^m \mathbf{B}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{l}_i$ 。

2 基于 SINEX 文件的 ERP 参数估计

IGS SINEX 单天解文件所给出的 ERP 参数形式为在参考历元的 ERP 参数值(x_{t_0})及其斜率(dx/dt)。

在连续的单天解 ERP 参数的综合处理中,需要考虑 ERP 参数在每天边界的连续性问题,因此需要将参考历元的 ERP 参数值及其斜率转化为每天两个边界的 ERP 参数值。因此需要将以 $\mathbf{x} = [x_{(t_1+t_2)/2} \ \frac{dx}{dt}]^T$ 表示的参数转换为以 $\tilde{\mathbf{x}} = [x_{t_1} \ x_{t_2}]^T$ 表示的参数。这里, x_{t_1} 为 t_1 时刻(起点)的参数值, x_{t_2} 为 t_2 时刻(终点)的参数值。 $x_{(t_1+t_2)/2}$ 为 t_1 到 t_2 中间时刻的参数值,这需要用到参数转换的过程。

由以上所述,有:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{t_2-t_1}{2} \\ 1 & \frac{t_2-t_1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{(t_1+t_2)/2} \\ \frac{dx}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{t_1} \\ x_{t_2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

则对应于参数转换方程 $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{d}x$,有:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{t_2-t_1}{2} \\ 1 & \frac{t_2-t_1}{2} \end{pmatrix}, \mathbf{d}x = 0 \quad (12)$$

利用上述的参数转换方程,对单天解的 ERP 参数进行转换,转换后的相邻两天的 ERP 参数描述如图 1。在进行多天的 ERP 参数综合求解时,需要附加地球自转参数边界连续条件:

$$x_i - x_{i+1} = 0 \quad (13)$$

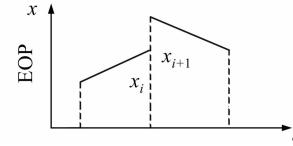


图 1 相邻两天的 ERP 参数

Fig. 1 The ERP of Back-to-back Two Days

由此可见,对于地球自转参数估计的算法实现,需要用到参数转换和附加约束条件两种基本的算法,其详细的实现步骤如下。

1) 恢复单天解法方程。顾及实际情况,并不失一般性,设单天解的地球自转参数为 $x_i = \begin{bmatrix} x_{ie} \\ \dot{x}_i \end{bmatrix}$, i 为单天解所对应的天数, x_{ie} 为第 i 天参考历元(通常是每天中午 12:00:00)的地球自转参数, \dot{x}_i 为第 i 天地球自转参数的变化率,其对应的法方程系统为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ie} \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

该法方程通过 SINEX 文件转换得到,其间经过了先验约束的消除过程,地球自转参数可与其他参数联合估计,也可经过参数预消除后独立估计。为讨论问题的方便,只讨论与地球自转参数相关的法方程部分的处理。

2) 进行参数转换。参照式(11),取 $t_2 - t_1 = 1$,将参考历元的 ERP 参数值 x_i 及其变化率转化

为每天两个边界的 ERP 参数值 $\tilde{\mathbf{x}}_i = \begin{bmatrix} x_{is} \\ x_{ie} \end{bmatrix}$,有:

$$\tilde{\mathbf{x}}_i = \begin{pmatrix} 1 & -1/2 \\ 1 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{ie} \\ \dot{x}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{is} \\ x_{ie} \end{pmatrix} \quad (15)$$

3) 构建新法方程。参照式(3),有:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & -1/2 \\ 1 & 1/2 \end{pmatrix}, \mathbf{d}x = 0$$

其新法方程系统为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 \\ 1 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{is} \\ x_{ie} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{bmatrix}_i \quad (16)$$

令

$$\tilde{\mathbf{N}}_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} 1 & -1/2 \\ 1 & 1/2 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{b}}_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{bmatrix}_i$$

有:

$$\tilde{\mathbf{N}}_i \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{is} \\ \mathbf{x}_{ie} \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{b}}_i \quad (17)$$

4) 进行 n 个单天解新法方程的叠加。参照式(8), 有 n 个单天解新法方程组成的总体法方程为:

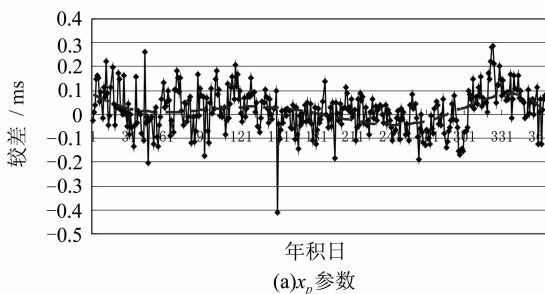
$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{N}}_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \tilde{\mathbf{N}}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{1s} \\ \mathbf{x}_{1e} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{ns} \\ \mathbf{x}_{ne} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{b}}_1 \\ \tilde{\mathbf{b}}_2 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{b}}_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

5) 引入 $n-1$ 个边界连续条件。在对 n 天的 ERP 参数综合求解时, 需要附加 $n-1$ 个地球自转参数边界连续条件(即第 i 天的最后一个历元与第 $i+1$ 天的第一个历元参数值相同), 其表示形式为:

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{x}_{1e} = \mathbf{x}_{2s} \\ \mathbf{x}_{2e} = \mathbf{x}_{3s} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{ie} = \mathbf{x}_{(i+1)s} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{(n-1)e} = \mathbf{x}_{ns} \end{array} \right\} \quad (19)$$

6) ERP 参数综合求解。利用式(18)和式(19), 对 n 天的 ERP 参数进行综合求解。此时有以下两种处理方法。

① 按附有限制条件的间接平差方法求解。即将式(19)作为附加的参数约束, 通用的参数约束为 $\mathbf{C}'\mathbf{x} = \mathbf{w}$, 对应于式(19), 有:

(a) x_p 参数

$$\mathbf{C}' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_{2n,1} = [\mathbf{x}_{1s} \ \mathbf{x}_{1e} \ \cdots \ \mathbf{x}_{ns} \ \mathbf{x}_{ne}]^T, \mathbf{w} = 0 \quad (20)$$

② 按参数转换的方法进行求解。附加边界连续条件的式(19)也可通过参数转换的方法予以实现, 对应于参数转换方程 $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{d}\mathbf{x}$, 有:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{2n,1} &= [\mathbf{x}_{1s} \ \mathbf{x}_{1e} \ \cdots \ \mathbf{x}_{ns} \ \mathbf{x}_{ne}]^T \\ \tilde{\mathbf{x}}_{n+1,1} &= [\mathbf{x}_{1s} \ \mathbf{x}_{1e} \ \cdots \ \mathbf{x}_{ns} \ \mathbf{x}_{ne}]^T \\ \mathbf{C}_{2n,n+1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{d}\mathbf{x} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

需要注意的是, 旧参数是 $2n \times 1$ 维的, 新参数是 $(n+1) \times 1$ 维的。可采用式(6)进行参数求解。本文采用按参数转换的方法进行 ERP 参数的综合求解。

3 算例分析

根据 2000 年 GPS 单天解 SINEX 文件 (sioigs10426.snx-sioigs10950.snx), 采用笔者所研制的基于坐标模式的广义网平差参数估计软件进行 ERP 参数的估计。将所估计的结果与 IGS 分析中心所提供的结果进行比较, 其较差如图 2。

图 2 中的“虚线”为所拟合的趋势线。从图 2(b)可以明显地看出, 单纯采用 GPS 技术, 所估计

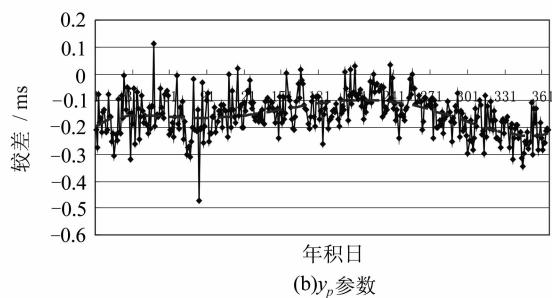
(b) y_p 参数

图 2 估计的参数与 IERS 结果的比较

Fig. 2 Comparison of Parameters and IERS Result

的极移参数 y_p 存在明显的系统差。为此,对所估计的极移参数进行四参数转换,转换方程为:

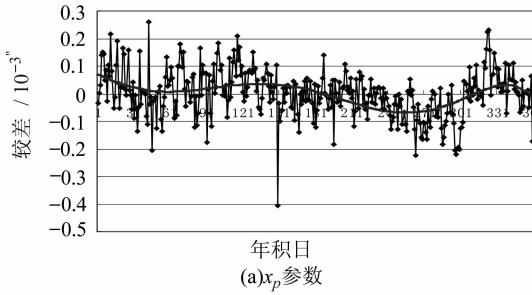
$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_p \\ \mathbf{y}_p \end{bmatrix}_{\text{new}} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_p \\ \Delta \mathbf{y}_p \end{bmatrix} + (1+m) \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p \\ \mathbf{y}_p \end{bmatrix}_{\text{old}} \quad (22)$$

式中, $\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_p \\ \Delta \mathbf{y}_p \end{bmatrix}$ 为平移参数; m 为尺度参数; α 为旋

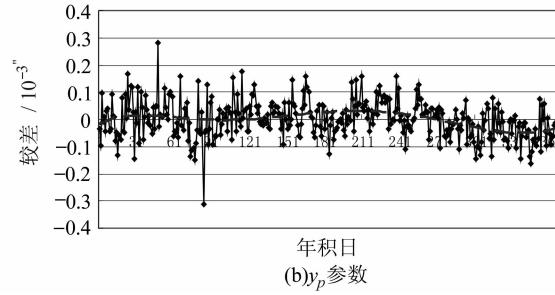
转参数; $\begin{bmatrix} \mathbf{x}_p \\ \mathbf{y}_p \end{bmatrix}_{\text{new}}$ 为 IERS 所发布的结果; $\begin{bmatrix} \mathbf{x}_p \\ \mathbf{y}_p \end{bmatrix}_{\text{old}}$ 为

单纯采用 GPS 技术所估计的结果。经过参数转换以后,其与 IERS 的比较结果如图 3。

从图 3(b)可以看出,相对于图 2(b)而言,经过四参数转换以后,其系统误差得到了很好的消除。图 4 为所估计的 UT1-UTC 参数与 IERS 结果



(a) x_p 参数



(b) y_p 参数

图 3 经参数转换后估计的参数与 IERS 结果的比较

Fig. 3 Comparison of Transformed Parameter and IERS Result

的比较,可以看出,两者的互差基本在 0.1 ms 以内。

4 结语

利用 IGS 所发布的对 GPS 全球站处理后形成的单天解 SINEX 文件,可进行 ERP 参数的估计。利用参数转换的方法可简化计算过程。计算结果表明,直接利用 GPS 观测结果进行 ERP 参数的估计可能不能消除系统误差影响。至于在

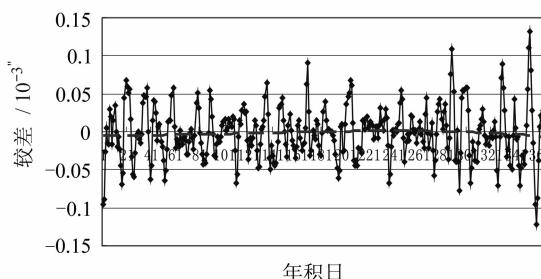


图 4 估计的 UT1-UTC 参数与 IERS 结果的比较

Fig. 4 Comparison of UT1-UTC Parameter and IERS Result

GPS 全球站处理后形成的单天解 SINEX 文件中,其 ERP 参数为何尚存在比较明显的系统误

差,该系统误差对其他类参数估计是否存在影响,其影响的量级如何,需要进一步深入研究。

参 考 文 献

- 姚宜斌. GPS 精密定位定轨后处理算法与实现: [博士论文]. 武汉: 武汉大学, 2004
- Springer T A. Modeling and Validating Orbits and Clocks Using the Global Positioning System. Swiss National Reports on Geodetic Activities, 2000
- Brockman E. Combination of Solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System (GPS): [Ph. D Thesis]. Berne: Astronomical Institute University of Berne, 1997
- Dong O, Herring T A, King R W. Estimating Regional Deformation from a Combination of Space and Terrestrial Geodetic Data. J. Geodesy, 1998 (72): 200~214
- 隋立芬. 高精度 GPS 网的统一与数据处理若干问题研究: [博士论文]. 郑州: 信息工程大学, 2001
- 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型. 北京: 测绘出版社, 1998

第一作者简介: 姚宜斌, 博士, 副教授, 现主要从事高精度 GPS 数据分析理论和方法研究。

E-mail: ybyao@sge.whu.edu.cn

ERP Parameters Estimation Based on SINEX File

YAO Yibin¹ LIU Jingnan^{2,3} TAO Benzao¹ SHI Chuang³

(1) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2) Presidential Secretariat, Wuhan University, LuoJia Hill, Wuhan 430072, China)

(3) Research Center of GPS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this paper, the methods of ERP parameters estimation based on IGS SINEX file of GPS solution are discussed in details. To estimate ERP parameters, two different ways are involved: one is the parameter transformation, the other is direct adjustment method with restrictive conditions. And the estimated results with independent copyright program are compared to IERS results.

Key words: ERP parameters; parameter transformation; systemic error

About the first author: YAO Yibin, Ph.D., associate professor, he is concentrated on the research of the theory and methods of high precision GPS data processing.

E-mail: ybyao@sgg.whu.edu.cn

(上接第 738 页)

Equivalence of Network-Solution and PPP-Solution

LIU Yanxiong¹ PENG Lin¹ ZHOU Xinghua¹ WU Yongting¹

(1) The First Oceanography Institute, SOA, 6 Xianxialing Road, High-Tech. District, Qingdao 266061, China)

Abstract: In this paper, the formulae of local parameters are firstly derived under the network-solution and the PPP-solution conditions, respectively. If the weight matrix of global parameter in PPP-solution is small enough, the expression of local parameters are the same as that in network-solution. Then, 16 daily solutions are obtained in both PPP mode and network mode. Three sites are selected to compare their solution differences. The experimental results demonstrated that their difference between two solutions in coordinates and tropospheric delays are only few millimeters.

Key words: network-solution; precise point positioning; equivalence

About the first author: LIU Yanxiong, Ph.D., research scientist. His research interests is GPS meteorology, satellite positioning technique.

E-mail: yxliu@fio.org.cn