

# 星载 GNSS 低轨卫星精密定轨快速解算方法<sup>\* 1</sup>

田英国<sup>1)</sup> 郝金明<sup>1)</sup> 刘伟平<sup>1)</sup> 于合理<sup>1)</sup> 王 鸿<sup>2)</sup> 杨剑伟<sup>1)</sup>

(<sup>1)</sup>信息工程大学, 郑州 450001  
(<sup>2)</sup>中国人民解放军 66444 部队, 北京 100042)

**摘 要** 针对星载 GNSS 低轨卫星精密定轨过程中需估计大量的钟差参数、模糊度参数及伪随机轨道参数, 导致求解耗时较长的问题, 利用参数预消除的原理分别对不同类型的待估参数进行预消除从而提高计算效率, 并对伪随机轨道参数难以直接预消除问题进行分析, 给出了利用轨道参数在子区间  $I_{i-1}$  与  $I_i$  间的递推关系进行参数预消除的方法。最后通过实验验证了该方法的有效性。

**关键词** 约化动力学定轨; 法方程; 参数预消除; 伪随机轨道参数; 快速解算

中图分类号: P207 文献标识码: A

## A RAPID SOLUTION METHOD ON PRECISE ORBIT DETERMINATION OF LEOS USING GNSS

Tian Yingguo<sup>1)</sup>, Hao Jinming<sup>1)</sup>, Liu Weiping<sup>1)</sup>, Yu Heli<sup>1)</sup>, Wang Hong<sup>2)</sup> and Yang Jianwei<sup>1)</sup>

(<sup>1)</sup>Information Engineering University, Zhengzhou 450001  
(<sup>2)</sup>66444 Troops of PLA, Beijing 100042)

**Abstract** A method of pre-eliminating respectively various types of estimated parameters was presented. In the process of solving precise orbit determination of LEOs, it is needed a large amount of time to deal a large number of clock parameters, ambiguity parameters and pseudo-stochastic orbit parameters. Experiments indicate that the method, can improve calculating efficiency.

**Key words:** reduced-dynamic precise orbit determination; the normal equation system; parameter pre-elimination; pseudo-stochastic orbit parameter; rapid solution

## 1 引言

随着低轨卫星的广泛应用, 人们对其轨道确定的精度、可靠性和实时性提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>。低轨卫星轨道精度、可靠性以及实时性主要取决于测轨技术、动力学模型的精细程度以及轨道确定综合处理方法。目前, 星载 GNSS 测轨技术因其具有全天候、价格低、不受卫星高度影响并且测轨精度高等特点, 已成为低轨卫星精密定轨最有效的手段。

然而由于空间环境复杂, 动力学模型误差一直是低轨卫星精密定轨的主要限制因素<sup>[4]</sup>。为此, Yunck 等<sup>[5]</sup>提出使用约化动力学定轨的方法确定低轨卫星精密轨道。但是, 由于约化动力学定轨需要估计大量的伪随机轨道参数、接收机钟差参数以及模糊度参数等而耗时较长。

设计矩阵  $A$  和法方程系数  $N$  的建立是低轨卫星精密定轨的关键。在轨道求解过程中, 涉及到矩阵的运算往往耗时较长, 尤其是矩阵求逆过程<sup>[6]</sup>。

\* 收稿日期: 2013-04-29

作者简介: 田英国, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要从事星载 GNSS 低轨卫星精密定轨方法研究. E-mail: tianyg1987@sina.com

本文通过对一般的星载 GNSS 低轨卫星精密定轨误差模型中不同类型的参数进行分析,给出了不同类型参数预消除的基本方案。重点对伪随机轨道参数难以直接预消除问题,给出了利用轨道参数在子区间  $I_{i-1}$  与  $I_i$  间的递推关系进行参数预消除的方法。

## 2 低轨卫星精密定轨快速解算方法

设定轨误差方程为

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{l} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{X}$  为待估的钟差参数、模糊度参数和轨道参数,  $\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}}$  为模型函数关于待估参数  $\mathbf{X}$  的偏导数,  $\mathbf{V}$  为相应的改正数,  $\mathbf{l}$  为观测值与计算值的差值<sup>[7]</sup>。

据式(1)得低轨卫星精密定轨的法方程为:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (2)$$

记  $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$ , 则  $\mathbf{X} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$ 。

### 2.1 钟差与模糊度参数处理

#### 2.1.1 钟差与模糊度参数预消除

由式(2)可得星载 GNSS 低轨卫星精密定轨法方程为:

$$\begin{pmatrix} N_{cc} & N_{cx} & N_{cb} \\ N_{xc} & N_{xx} & N_{xb} \\ N_{bc} & N_{bx} & N_{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{c} \\ \mathbf{x} \\ \mathbf{b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_c \\ \mathbf{b}_x \\ \mathbf{b}_b \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{c}$ 、 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{b}$  分别为待估的钟差参数、轨道参数、模糊度参数,  $\mathbf{N}$  为相应参数的法方程矩阵及相关矩阵,  $\mathbf{b}_c$ 、 $\mathbf{b}_x$  和  $\mathbf{b}_b$  为观测值与计算值的差值。

为了方便钟差参数和模糊度参数的预消除,将其组合为一个待估参数  $\mathbf{p}$ , 即<sup>[8]</sup>

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} \mathbf{c} \\ \mathbf{b} \end{pmatrix} \quad (4)$$

则式(3)可以表示为:

$$\begin{pmatrix} N_{pp} & N_{px} \\ N_{xp} & N_{xx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_p \\ \mathbf{b}_x \end{pmatrix} \quad (5)$$

式(5)左右两边同时乘以  $(-N_{px} \quad N_{pp}^{-1} \quad \mathbf{I})$  可得

$$(N_{xx} - N_{xp} N_{pp}^{-1} N_{px}) \mathbf{x} = (\mathbf{b}_x - N_{xp} N_{pp}^{-1} \mathbf{b}_p) \quad (6)$$

即

$$\mathbf{x} = (N_{xx} - N_{xp} N_{pp}^{-1} N_{px})^{-1} (\mathbf{b}_x - N_{xp} N_{pp}^{-1} \mathbf{b}_p) \quad (7)$$

#### 2.1.2 钟差与模糊度参数回代

将求得的待估参数  $\mathbf{x}$  代入式(5)可得

$$\mathbf{p} = N_{pp}^{-1} (\mathbf{b}_p - N_{px} \mathbf{x}) \quad (8)$$

则未知参数向量  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{p}$  的协方差矩阵分别为:

$$\mathbf{Q}_{xx} = (N_{xx} - N_{xp} N_{pp}^{-1} N_{px})^{-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{Q}_{pp} = N_{pp}^{-1} + N_{pp}^{-1} N_{px} \mathbf{Q}_{xx} N_{xp} N_{pp}^{-1} \quad (10)$$

从数学的角度来讲,式与和式的求解结果是一

致的。但是经过上述变换,将维数庞大的法方程系数矩阵分成维数较小的矩阵,这样大大提高了轨道求解的效率。

## 2.2 伪随机轨道参数处理

### 2.2.1 伪随机轨道参数预消除

仅含有轨道参数的定轨误差方程可表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r =$$

$$\sum_{k=1}^6 (\nabla \mathbf{F}_r)^T \cdot z_{0k}(t) \left( \mathbf{O}_k + \sum_{m=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{0k^m j} v_{m,j} \right) - \mathbf{l}_r \quad (11)$$

其中,  $(\nabla \mathbf{F}_r)^T = \left( \frac{\partial \mathbf{F}_r}{\partial r_{0,1}} \quad \frac{\partial \mathbf{F}_r}{\partial r_{0,2}} \quad \frac{\partial \mathbf{F}_r}{\partial r_{0,3}} \right)$  表示精密轨道模型功能函数  $\mathbf{F}_r$  的梯度,  $z_{0k}(t) = \frac{\partial r_0(t)}{\partial r_0(t_0)}$  表示  $t$  时刻

的轨道对  $t_0$  时刻的初始轨道参数的偏导数。

根据式(1)可得在子区间  $I_i = (t_i, t_{i+1})$  内  $n_{o_i}$  个误差方程的矢量表达式为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = (\mathbf{A}_i \quad \mathbf{A}_i \mathbf{B}_i \quad \cdots \quad \mathbf{A}_i \mathbf{B}_i) \begin{pmatrix} \mathbf{o} \\ \mathbf{v}_i \\ \vdots \\ \mathbf{v}_i \end{pmatrix} - \mathbf{l}_i \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{o}$  为对初始轨道根数先验值  $\mathbf{O}$  的改正值,  $\mathbf{v}_i$  为在  $I_i$  子区间的伪随机轨道参数,  $\boldsymbol{\varepsilon}_i$  为在子区间  $I_i$  内的偏差值,  $\mathbf{l}_i$  为观测值与计算值间的差值,  $\mathbf{B}_{i[k;j]} = \beta_{0k^j i,j}$ 。

误差方程(12)隐含了如下转换关系:

$$\mathbf{o}_i = \mathbf{o} + \sum_{m=1}^i \mathbf{B}_m \mathbf{v}_m \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{o}_i$  表示在子区间  $I_i$  内对先验轨道  $\mathbf{O}_i$  的改正值。

式(13)的递归形式可写为:

$$\begin{cases} \mathbf{o}_0 = \mathbf{o} & i=0 \\ \mathbf{o}_{i-1} = \mathbf{o}_i - \mathbf{B}_i \mathbf{v}_i = (\mathbf{I}_6 \quad -\mathbf{B}_i) \begin{pmatrix} \mathbf{o}_i \\ \mathbf{v}_i \end{pmatrix} & i>0 \end{cases} \quad (14)$$

如果综合所有满足  $t \leq t_i$  的观测量,则对应的法方程可以一种简化的形式表示为:

$$\bar{\mathbf{N}}_{i-1} \mathbf{o}_{i-1} = \bar{\mathbf{b}}_{i-1} \quad (15)$$

其中  $\bar{\mathbf{N}}_{i-1}$  和  $\bar{\mathbf{b}}_{i-1}$  可以通过  $\mathbf{N}_l$  和  $\mathbf{b}_l$ ,  $l=0, \dots, i-1$  等计算得到。其转换关系为:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{N}}_0 &= \mathbf{N}_0 & ; i=1 \\ \bar{\mathbf{b}}_0 &= \mathbf{b}_0 & \\ \bar{\mathbf{N}}_{i-1} &= \bar{\mathbf{N}}_{i-2} + \mathbf{N}_{i-1} & \\ \bar{\mathbf{b}}_{i-1} &= \bar{\mathbf{b}}_{i-2} + \mathbf{b}_{i-1} & ; i \geq 2 \end{aligned} \quad (16)$$

将式(14)代入到式(15)可得

$$(\bar{\mathbf{N}}_{i-1} - \bar{\mathbf{N}}_{i-1} \mathbf{B}_i) \begin{pmatrix} \mathbf{o}_i \\ \mathbf{v}_i \end{pmatrix} = \bar{\mathbf{b}}_{i-1} \quad (17)$$

式(17)两边同时左乘 $(\mathbf{I}_6 - \mathbf{B}_i^T)$ ,可得

$$\begin{pmatrix} \bar{\mathbf{N}}_{i-1} & -\bar{\mathbf{N}}_{i-1}\mathbf{B}_i \\ -\mathbf{B}_i^T\bar{\mathbf{N}}_{i-1} & \mathbf{B}_i^T\bar{\mathbf{N}}_{i-1}\mathbf{B}_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{o}_i \\ \mathbf{v}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{b}}_{i-1} \\ -\mathbf{B}_i^T\bar{\mathbf{b}}_{i-1} \end{pmatrix} \quad (18)$$

根据观测模型(11)可知,在子区间 $\mathbf{I}_i, \mathbf{I}_{i+1}, \dots, \mathbf{I}_{n-1}$ 内观测模型不依赖伪随机轨道参数 $\mathbf{v}_i$ ,由于 $\mathbf{v}_i$ 的影响在 $\mathbf{o}_i$ 中已经考虑,因此可以利用参数预消除原理对伪随机轨道参数进行消除。

式(18)两边同时左乘 $(\mathbf{I} \bar{\mathbf{N}}_{i-1} \mathbf{B}_i (\mathbf{B}_i^T \bar{\mathbf{N}}_{i-1} \mathbf{B}_i)^{-1})$ 可得

$$\bar{\mathbf{N}}_{i-1}^* \mathbf{o}_i = \bar{\mathbf{b}}_{i-1}^* \quad (19)$$

其中,

$$\bar{\mathbf{N}}_{i-1}^* = \bar{\mathbf{N}}_{i-1} - \bar{\mathbf{N}}_{i-1}\mathbf{B}_i (\mathbf{B}_i^T \bar{\mathbf{N}}_{i-1} \mathbf{B}_i)^{-1} \mathbf{B}_i^T \bar{\mathbf{N}}_{i-1} \quad (20)$$

$$\bar{\mathbf{b}}_{i-1}^* = \bar{\mathbf{b}}_{i-1} - \bar{\mathbf{N}}_{i-1}\mathbf{B}_i (\mathbf{B}_i^T \bar{\mathbf{N}}_{i-1} \mathbf{B}_i)^{-1} \mathbf{B}_i^T \bar{\mathbf{b}}_{i-1}$$

类似于式(16)和(20),可以得到

$$\bar{s}_0 = \mathbf{l}_0^T \mathbf{P}_0 \mathbf{l}_0 \quad ; i=1 \quad (21)$$

$$\bar{s}_{i-1} = \bar{s}_{i-2}^* + \mathbf{l}_{i-1}^T \mathbf{P}_{i-1} \mathbf{l}_{i-1} \quad ; i \geq 2$$

$$\bar{s}_{i-1}^* = \bar{s}_{i-1} - \bar{\mathbf{b}}_{i-1}^T \mathbf{B}_i (\mathbf{B}_i^T \bar{\mathbf{N}}_{i-1} \mathbf{B}_i)^{-1} \mathbf{B}_i^T \bar{\mathbf{b}}_{i-1} \quad (22)$$

星载 GNSS 低轨卫星精密定轨的整个处理过程可以通过式(15)、(18)、(19)和(16)从子区间 $\mathbf{I}_0 = (t_0, t_1)$ 计算到子区间 $\mathbf{I}_{n-1} = [t_{n-1}, t_n]$ ,最终可得

$$\mathbf{o}_{n-1} = \bar{\mathbf{N}}_{n-1}^{-1} \bar{\mathbf{b}}_{n-1} \quad (23)$$

验后单位权标准误差为:

$$m_0 = \sqrt{\frac{\bar{s}_{n-1} - \mathbf{o}_{n-1}^T \bar{\mathbf{b}}_{n-1}}{f}} \quad (24)$$

根据最小二乘原理, $\mathbf{o}_{n-1}$ 的协方差矩阵为:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{o}_{n-1}\mathbf{o}_{n-1}} = m_0^2 \mathbf{Q}_{\mathbf{o}_{n-1}\mathbf{o}_{n-1}} = m_0^2 \bar{\mathbf{N}}_{n-1}^{-1} \quad (25)$$

### 2.2.2 伪随机轨道参数回代

在实际应用中,还要求解伪随机轨道参数,所以需要将求解结果回代到原方程中解算伪随机轨道参数。

首先定义

$$\bar{\mathbf{N}}_{n-1} = \bar{\mathbf{N}}_{n-2} + \mathbf{N}_{n-1} \quad (26)$$

$$\bar{\mathbf{b}}_{n-1} = \bar{\mathbf{b}}_{n-2} + \bar{\mathbf{b}}_{n-1}$$

根据方程(18)可以得到

$$\begin{pmatrix} \bar{\mathbf{N}}_{n-1} & -\bar{\mathbf{N}}_{n-2}\mathbf{B}_{n-1} \\ -\mathbf{B}_{n-1}^T \bar{\mathbf{N}}_{n-1} & \mathbf{B}_{n-1}^T \bar{\mathbf{N}}_{n-2}\mathbf{B}_{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{o}_{n-1} \\ \mathbf{v}_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{b}}_{n-1} \\ -\mathbf{B}_{n-1}^T \bar{\mathbf{b}}_{n-1} \end{pmatrix} \quad (27)$$

将式(23)代入式(27),得

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_{n-1} \\ \mathbf{o}_{n-1} \end{pmatrix} = (\mathbf{B}_{n-1}^T \bar{\mathbf{N}}_{n-2} \mathbf{B}_{n-1})^{-1} (\mathbf{B}_{n-1}^T \bar{\mathbf{N}}_{n-2} \mathbf{o}_{n-1} - \mathbf{B}_{n-1}^T \bar{\mathbf{b}}_{n-2}) \quad (28)$$

伪随机轨道参数回代的处理通过式(27)和(28)从子区间 $\mathbf{I}_{n-1} = [t_{n-1}, t_n]$ 到子区间 $\mathbf{I}_0 = [t_0, t_1]$ 逐步递推求得。

设 $\mathbf{o}_{n-1}$ 和 $\mathbf{v}_{n-1}$ 的权逆阵分别为 $\mathbf{Q}_{\mathbf{o}_{n-1}\mathbf{o}_{n-1}}$ 、 $\mathbf{Q}_{\mathbf{v}_{n-1}\mathbf{v}_{n-1}}$ 、 $\mathbf{Q}_{\mathbf{o}_{n-1}\mathbf{v}_{n-1}}$ 和 $\mathbf{Q}_{\mathbf{v}_{n-1}\mathbf{o}_{n-1}}$ ,则

$$\begin{pmatrix} \bar{\mathbf{N}}_{n-1} & -\bar{\mathbf{N}}_{n-2}\mathbf{B}_{n-1} \\ -\mathbf{B}_{n-1}^T \bar{\mathbf{N}}_{n-1} & \mathbf{B}_{n-1}^T \bar{\mathbf{N}}_{n-2}\mathbf{B}_{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_{\mathbf{o}_{n-1}\mathbf{o}_{n-1}} & \mathbf{Q}_{\mathbf{o}_{n-1}\mathbf{v}_{n-1}} \\ \mathbf{Q}_{\mathbf{o}_{n-1}\mathbf{v}_{n-1}}^T & \mathbf{Q}_{\mathbf{v}_{n-1}\mathbf{v}_{n-1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_6 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{pmatrix} \quad (29)$$

根据式(29)求得:

$$\mathbf{Q}_{\mathbf{o}_{n-1}\mathbf{v}_{n-1}} = \mathbf{Q}_{\mathbf{o}_{n-1}\mathbf{o}_{n-1}} \bar{\mathbf{N}}_{n-2} \mathbf{B}_{n-1} (\mathbf{B}_{n-1}^T \bar{\mathbf{N}}_{n-2} \mathbf{B}_{n-1})^{-1} \quad (30)$$

$$\mathbf{Q}_{\mathbf{v}_{n-1}\mathbf{v}_{n-1}} = (\mathbf{B}_{n-1}^T \bar{\mathbf{N}}_{n-2} \mathbf{B}_{n-1})^{-1} (\mathbf{I}_3 - \mathbf{B}_{n-1}^T \bar{\mathbf{N}}_{n-2} \mathbf{Q}_{\mathbf{o}_{n-1}\mathbf{v}_{n-1}}) \quad (31)$$

$\mathbf{v}_{i-1}$ 的协方差矩阵为:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{v}_{n-1}\mathbf{v}_{n-1}} = m_0^2 \mathbf{Q}_{\mathbf{v}_{n-1}\mathbf{v}_{n-1}} \quad (32)$$

通过递推方式对伪随机轨道参数进行处理可以大大降低法方程的维数。

## 3 算例分析

为了验证该算法的有效性,将本文计算结果与用常规计算方法所得结果进行比较。由于本文只涉及法方程的求解问题,所以对观测量的整理、组建法方程步骤未进行时间统计。

采用 GRACE-A 卫星 2012 年 1 月 20 日的数,取时长为 4 小时和 8 小时的弧段分别进行处理。待估参数及观测统计情况如表 1 所示。

表 1 待估参数及观测统计情况

Tab. 1 Statistics of estimated parameters and observations

弧段长度(小时)	4	8
模糊度参数	80	148
接收机钟差	480	960
载波观测总数	3 840	7 700

初始轨道参数、伪随机轨道参数、模糊度参数、钟差参数为未知量,GNSS 精密轨道和精密钟差产品作为已知值<sup>[9]</sup>。两种方法对不同参数的处理策略如表 2 所示。

表 2 两种方法对不同参数的处理策略

Tab. 2 Different parameters processing strategy for the two methods

计算方法	快速解算	常规解算
模糊度参数	预消除	估计
接收机钟差	预消除	预消除
伪随机轨道参数	预消除	估计

计算机配置:Inter Core i3-2100、3.10 GHz 处理器,内存 2.91 GB,硬盘 500 G,Windows XP 系统。

计算程序:采用在 Visual Studio 2005 环境下 C# 语言自编的程序。

主要统计信息:在 4 小时和 8 小时弧段上分别统计每隔 1、2、3、5、6、9、10 和 15 分钟增加一组伪随机轨道参数的求解耗时。为减小计算机性能不稳定造成的影响,所有统计信息都是通过统计 10 次求解耗时,然后将它们的平均值作为最终的统计结果。

计算总耗时统计情况:4、8 小时弧段轨道解算耗时详细统计如图 1、2。

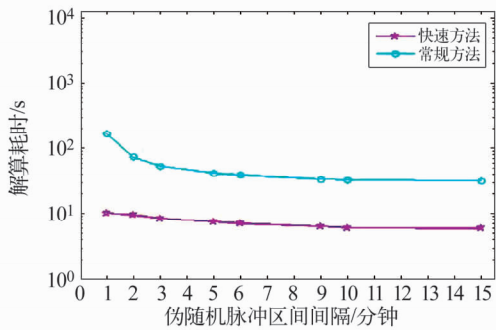


图 1 4 小时弧段轨道解算耗时统计

Fig. 1 Statistics of CPU execution times for 4 hour segmental arc orbit determination

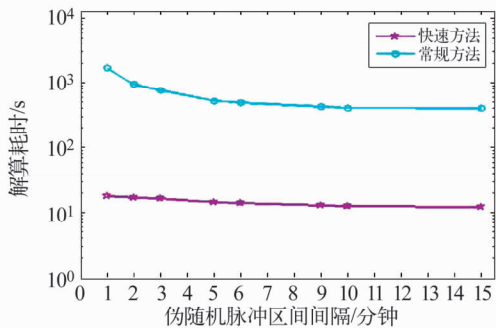


图 2 8 小时弧段轨道解算耗时统计

Fig. 2 Statistics of CPU execution times for 8 hour segmental arc orbit determination

从图 1、2 可以看出,本文给出的快速解算方法较常规的解算方法计算效率提高非常明显。如在 8 小时弧段伪随机脉冲区间间隔长度为 1 分钟时,对于常规解算方法耗时为上千秒,而本文给出的算法耗时仅为十几秒。另外,从图 1、2 可以看出,在 8 小时解算弧段和 4 小时解算弧段中,8 小时弧段解算效率提高更显著。这也说明了本文给出的方法在长弧段轨道计算中较常规方法更具优势。

## 4 结论

1) 利用伪随机轨道参数在相邻子区间之间的

关系对伪随机轨道参数进行参数预消除的方法简单易行,能够显著提高计算效率。

2) 相比常规的解算方法,利用参数预消除的原理分别对不同类型的待估参数进行预消除的解算方法可以大大提高星载 GNSS 低轨卫星精密定轨的效率。对于轨道弧段较长、伪随机轨道参数间隔时间较短的情况效果更加显著。

致谢 衷心感谢全球监测评估系统信息工程大学分析中心对本文工作的帮助和支持!

## 参 考 文 献

- 1 Adrian Jäggi. Pseudo-stochastic orbit modeling of low earth satellites using the global positioning system[D]. Astronomical institute university of Berne, Switzerland, 2007.
- 2 Svehla D and Rothacher M. Kinematic and reduced-dynamic precise orbit determination of low earth orbiters [J]. Advances in Geosciences, 2003, 1: 47 - 56.
- 3 Jäggi A, et al. Orbit determination of low earth satellites at AIUB[A]. IGS Workshop[C]. ESOC, Darmstadt, Germany, 2006.
- 4 金勇, 刘林. 低轨卫星力模型修正研究[J]. 飞行器测控学报, 2008, 27(5): 65 - 67. (Jin Yong and Liu Lin. On force model compensations of low earth orbit satellites[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008, 27(5): 65 - 67)
- 5 Wu S C, Yunck T P and Thornton C L. Reduced-dynamic technique for precise orbit determination of low Earth satellites [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1991, 14(1): 24 - 30.
- 6 宋力杰, 欧阳桂崇. 超大规模大地网分区平差快速解算方法[J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 204 - 207. (Song Lijie and OuYang Guichong. A fast method of solving partitioned adjustment for super largescale geodetic network [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(3): 204 - 207)
- 7 隋立芬, 宋力杰. 误差理论与测量平差基础[M]. 北京: 解放军出版社, 2004. (Sui Lifan and Song Lijie. The error theory and measurement of adjustment basis[M]. Beijing: PLA Publishing House, 2004)
- 8 姚宜斌. GPS 精密定位定轨后处理算法实现[D]. 武汉大学, 2004. (Yao Yibin. Research on the algorithm and realization of post processing for GPS precise positioning and orbit determination[D]. Wuhan University, 2004)
- 9 秦显平. 星载 GPS 低轨卫星定轨理论及方法研究[D]. 解放军信息工程大学, 2009. (Qin Xianping. Research on precision orbit determination theory and method of low earth orbiter based on GPS technique[D]. PLA Information Engineering University, 2009)