

GPS 单星单历元模糊度与电离层延迟分类解算

郭金运^{1,2}, 宗 干¹, 李 旺¹, 赵春梅³, 于金蓉¹

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 青岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室, 山东 青岛 266590; 3. 中国测绘科学研究院, 北京 100830)

摘 要: 整周模糊度与电离层延迟是 GPS 观测方程中两类不同性质的未知参数。基于参数分类解算的思想, 结合平方根信息滤波/平滑的基本原理, 推导出使用单颗 GPS 卫星的双频观测数据单历元求解电离层延迟与整周模糊度的公式。通过使用模拟数据实验获得的结果来看, 该方法有效, 整周模糊度和电离层延迟解算精度可达 0.3 周和 0.02 m。

关键词: 电离层延迟; 整周模糊度; 平方根信息滤波/平滑; 单历元; GPS 单星

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2015)01-0054-07

Classification Solution of Single-Epoch Ambiguity and Ionospheric Delay for Single GPS Satellite

Guo Jinyun^{1,2}, Zong Gan¹, Li Wang¹, Zhao Chunmei³, Yu Jinrong¹

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef of NASMG, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China)

Abstract: Ionosphere delay and ambiguity are the two idiosyncratic parameters in GPS observation equations. Based on the parameter classification, the equation to estimate the ionosphere delay and ambiguity was concluded by using the single-epoch observation data from the single GPS satellite with the square root information filter/smoothing (SRIF/S). The results from the simulation data show that the method is effective and the ambiguity and Ionosphere delay can be successfully estimated with an accuracy of 0.3 cycles and 0.02 m respectively.

Key words: ionosphere delay; ambiguity; square root information filter/smoothing; single epoch; single GPS satellite

整周模糊度和电离层延迟是 GPS(Global Positioning System)定位中需要确定的两类参数。电离层延迟可通过求出或者消去的方法来处理, 求出电离层延迟可以使用改正模型, 常用的有预报模型(如 Klobuchar 模型^[1]), 用于类似 WAAS(广域增强系统, Wide Area Augmentation System)的广域或局域差分模型和全球(区域)后处理模型^[2]; 消去电离层延迟的方法一般使用观测量的线性组合, 但这只能消除电离层延迟一阶主项的影响^[3]。整周模糊度的处理方法可分为两类: 一是消除整周模糊度, 三差法就是典型的消除整周模糊度的方法; 二是解出模糊度, 这类方法又可分为坐标域内、观测域内、模糊度域内求解模糊度^[4]三种。以上求解两种参数的方法往往计算过程较复杂, 计算量较大, 固定模糊度时较大的搜索空间将导致搜索计算中

收稿日期: 2014-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41374009, 41274018); 国家测绘地理信息局公益性行业科研专项(201412001); 山东省自然科学基金项目(ZR2013DM009); 现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室基金项目(TJES1101, TJES1203)

作者简介: 郭金运(1969—), 男, 山东巨野人, 教授, 博士生导师, 主要从事空间大地测量、海洋大地测量和物理大地测量等研究。E-mail: jinyunguo1@126.com

占用大量计算机资源,而且数值计算方法选取不合适也将影响未知参数的解算精度。

针对以上问题,选用根据单颗卫星双频观测数据求解整周模糊度和电离层延迟的方法。考虑到这两类参数所具有的不同性质以及载波相位和伪距观测量的不同噪声水平,基于参数分类求解思想,使用平方根信息滤波/平滑(square root information filter/smoothing, SRIF/S)来进行数据处理和参数解算。为讨论该方法的可靠性,对 2013 年 1 月 1 日某测站的模拟双频 GPS 观测数据进行处理,并对处理结果进行分析。

1 电离层延迟与整周模糊度直接求解

联合使用 GPS 伪距和载波相位的双频观测数据可以求出某些特定参数^[5],两类观测方程可以表示为

$$\begin{cases} R_1 = \rho + \epsilon_{\text{ion}(1)} \\ R_2 = \rho + \epsilon_{\text{ion}(2)} \\ \lambda_1 \Phi_1 = \rho + \lambda_1 N_1 - \epsilon_{\text{ion}(1)} \\ \lambda_2 \Phi_2 = \rho + \lambda_2 N_2 - \epsilon_{\text{ion}(2)} \end{cases}; \quad (1)$$

其中: R_1, R_2 为 L1 和 L2 载波的伪距观测值; λ_1, λ_2 为载波波长; Φ_1, Φ_2 为相位观测值; ρ 包含了除电离层延迟之外其他误差与星站间几何距离之和; $\epsilon_{\text{ion}(1)}, \epsilon_{\text{ion}(2)}$ 为 L1 和 L2 载波上的电离层延迟; N_1, N_2 为整周模糊度。考虑到两种载波上的电离层延迟有近似关系: $\epsilon_{\text{ion}(2)} = (f_1^2/f_2^2)\epsilon_{\text{ion}(1)}$ ^[6], f_1 和 f_2 为载波频率。则式(1)可以改写为

$$\begin{cases} R_1 = \rho + \epsilon_{\text{ion}(1)} \\ R_2 = \rho + (f_1^2/f_2^2)\epsilon_{\text{ion}(1)} \\ \lambda_1 \Phi_1 = \rho + \lambda_1 N_1 - \epsilon_{\text{ion}(1)} \\ \lambda_2 \Phi_2 = \rho + \lambda_2 N_2 - (f_1^2/f_2^2)\epsilon_{\text{ion}(1)} \end{cases}; \quad (2)$$

这时式(2)中仅存在 $\rho, \epsilon_{\text{ion}(1)}, N_1, N_2$ 四个未知数,方程数等于未知数的个数,有唯一解,四个未知参数可以直接求出。但相对于电离层延迟和整周模糊度来说, ρ 并不是研究人员感兴趣的未知数,并且由于 ρ 与 $\epsilon_{\text{ion}(1)}$ 的量级差距巨大,使用计算机求解时舍入误差会对计算结果产生较大影响,因此对以上观测量进行线性组合。为表达简便,用 ϵ_{ion} 代替 $\epsilon_{\text{ion}(1)}$,可得

$$\begin{bmatrix} R_1 - R_2 \\ \lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2 \\ R_1 - \lambda_1 \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - f_1^2/f_2^2 & 0 & 0 \\ f_1^2/f_2^2 - 1 & \lambda_1 & -\lambda_2 \\ 2 & -\lambda_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{\text{ion}} \\ N_1 \\ N_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

对于已经完全修复周跳的观测数据,理论上通过式(3)就可求出 $\epsilon_{\text{ion}}, N_1, N_2$,但由于电离层延迟与整周模糊度并不属于同一类参数,对于连续跟踪的卫星,如果其信号传播介质没有变化,没有周跳发生并且仪器稳定可靠,其整周模糊度理论上不随时间而变化^[7-9],而电离层延迟会随时间变化,受过程噪声影响。因此,应对这两种参数进行分类解算。同时,由于不同观测值类型的噪声水平以及观测量本身精度不同,在进行观测量相减之后, ρ 中所包含的随机误差并没有被完全消除,因此在使用式(3)求解时这部分误差就混入待求参数中,降低解算结果精度。

2 基于参数分类的 SRIF/S 解算

针对以上问题,将电离层延迟和整周模糊度分开求解,并使用动态平方根信息滤波/平滑算法对观测数据进行处理。SRIF/S 是一种采用正交变换求解线性方程组的最小二乘解的方法,具有较高的数值稳定性和计算精度^[10-12],能有效改善计算发散问题^[13],可用于人造地球卫星或小天体探测器定轨^[14-16]、车辆导航寻北精度的提高^[13]以及单频精密单点定位^[17]等方面。整个处理过程包括三步^[14,17]:①使用先验信息求得第 k 个历元的状态参数;②根据状态转移方程求第 $k+1$ 历元的状态;③在滤波完成后使用第二步中保存的系数进行后向平方根信息平滑。

将未知参数分类,同时考虑随机噪声,则第 j 历元的观测方程(3)改写为

$$\mathbf{Z}_{(j)} + \mathbf{V}_{(j)} = \mathbf{A}_{\text{ion}} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j)} + \mathbf{A}_B \mathbf{B}_{(j)} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{Z}_{(j)} = \begin{bmatrix} R_1 - R_2 \\ \lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2 \\ R_1 - \lambda_1 \Phi_1 \end{bmatrix}$ 为组合观测量, $\mathbf{V}_{(j)} = \begin{bmatrix} V_R \\ V_\Phi \\ V_{R\Phi} \end{bmatrix}$ 为组合观测量的观测误差向量, $\mathbf{B}_{(j)} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{A}_{\text{ion}} = \begin{bmatrix} 1 - f_1^2 / f_2^2 \\ f_1^2 / f_2^2 - 1 \\ 2 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \lambda_1 & \lambda_2 \\ -\lambda_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

状态转移方程为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}_{(j+1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}_{(j)} + \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{\text{ion}} \\ 0 \end{bmatrix}_{(j)}. \quad (5)$$

其中: \mathbf{W}_{ion} 为电离层延迟动态过程噪声; \mathbf{I} 为单位阵。

观测方程及 \mathbf{W}_{ion} 的先验方程可写为

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Z}}_{\text{ion}} \\ \tilde{\mathbf{Z}}_B \end{bmatrix}_{(j)} + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{\text{ion}} \\ \mathbf{V}_B \end{bmatrix}_{(j)} = \tilde{\mathbf{A}}_{(j)} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}_{(j)}; \quad (6)$$

$$\tilde{\mathbf{Z}}_{W(j)} + \mathbf{V}_{W(j)} = \tilde{\mathbf{A}}_{W(j)} \mathbf{W}_{\text{ion}(j)}. \quad (7)$$

其中, 观测方程的先验方程系数阵 $\tilde{\mathbf{A}}_{(j)}$ 是上三角矩阵^[18], $\tilde{\mathbf{A}}_{(j)} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}_{11} & \tilde{\mathbf{A}}_{12} \\ 0 & \tilde{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix}$, 对于第一个历元, $\tilde{\mathbf{A}}_{(j)}$ 可根据电离层延迟和模糊度的先验协方差阵 \mathbf{A} , 对其进行 Cholesky 分解, 按照 $\mathbf{A} = \tilde{\mathbf{A}}_{(j)}^{-1} (\tilde{\mathbf{A}}_{(j)}^{-1})^T$ 求得^[15-16], 其后历元的 $\tilde{\mathbf{A}}_{(j)}$ 可以通过 Householder 正交变换^[10] 使用迭代算法获取。 $\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Z}}_{\text{ion}} \\ \tilde{\mathbf{Z}}_B \end{bmatrix}$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_{W(j)}$ 为先验观测值。 $\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{\text{ion}} \\ \mathbf{V}_B \end{bmatrix}_{(j)}$ 和 $\mathbf{V}_{W(j)}$ 是先验观测值的观测误差。

要求 $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j)}$ 和 $\mathbf{B}_{(j)}$ 的最小二乘解, 需要使目标函数

$$\min F = \|\mathbf{V}_{(j)}\|^2 + \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{\text{ion}} \\ \mathbf{V}_B \end{bmatrix}_{(j)} \right\|^2 + \|\mathbf{V}_{W(j)}\|^2; \quad (8)$$

将式(8)前两项展开, 可改写为

$$F = \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{ion}} & \mathbf{A}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}_{(j)} - \mathbf{Z} \right\|^2 + \left\| \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}_{11} & \tilde{\mathbf{A}}_{12} \\ 0 & \tilde{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}_{(j)} - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Z}}_{\text{ion}} \\ \tilde{\mathbf{Z}}_B \end{bmatrix}_{(j)} \right\|^2 + \|\mathbf{V}_{W(j)}\|^2; \quad (9)$$

对前两项进行重新组合, 并使用 Householder 正交变换可得

$$F = \left\| \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}}_{11} & \hat{\mathbf{A}}_{12} \\ 0 & \hat{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}_{(j)} - \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{\text{ion}} \\ \hat{\mathbf{Z}}_B \end{bmatrix}_{(j)} \right\|^2 + \left\| \tilde{\mathbf{A}}_{22} \mathbf{B}_{(j)} - \tilde{\mathbf{Z}}_{B(j)} \right\|^2 + \|\mathbf{V}_{W(j)}\|^2. \quad (10)$$

其中, 矩阵各元素可以由 $\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}}_{11} & \hat{\mathbf{A}}_{12} & \hat{\mathbf{Z}}_{\text{ion}(j)} \\ 0 & \hat{\mathbf{A}}_B & \hat{\mathbf{Z}}_B(j) \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}_{11} & \tilde{\mathbf{A}}_{12} & \tilde{\mathbf{Z}}_{\text{ion}(j)} \\ \mathbf{A}_{\text{ion}} & \mathbf{A}_B & \mathbf{Z}_{(j)} \end{bmatrix}$ 获得, \mathbf{T} 为 Householder 正交变换矩阵。

再将式(10)重新组合, 进行正交变换得

$$F = \left\| \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}}_{11} & \hat{\mathbf{A}}_{12} \\ 0 & \hat{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}_{(j)} - \hat{\mathbf{Z}}_{\text{ion}(j)} \right\|^2 + \left\| \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{22} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{B}_{(j)} - \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Z}}_B \\ \mathbf{e} \end{bmatrix}_{(j)} \right\|^2 + \|\mathbf{V}_{W(j)}\|^2; \quad (11)$$

同样地, 式(11)中新元素可由 $\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{22} & \bar{\mathbf{Z}}_{B(j)} \\ 0 & \mathbf{e}_{(j)} \end{bmatrix} = \mathbf{T}' \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}_{22} & \tilde{\mathbf{Z}}_{B(j)} \\ \hat{\mathbf{A}}_B & \hat{\mathbf{Z}}_B(j) \end{bmatrix}$ 得到。

考虑到式(5), 式(11)可进一步改写为:

$$F = \left\| \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}}_{11} & 0 & \hat{\mathbf{A}}_{12} \\ -m\tilde{\mathbf{A}}_{W(j)} & \tilde{\mathbf{A}}_{W(j)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j)} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j+1)} \\ \mathbf{B}_{(j)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{\text{ion}(j)} \\ \hat{\mathbf{Z}}_{\text{ion}(j+1)} \\ \tilde{\mathbf{Z}}_{W(j)} \end{bmatrix} \right\|^2 + \left\| \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{22} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{B}_{(j)} - \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Z}}_B \\ \mathbf{e} \end{bmatrix}_{(j)} \right\|^2; \quad (12)$$

再对第一项进行正交变换, 并与第二项合并, 可得

$$F = \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11}^* & \mathbf{A}_{12}^* & \mathbf{A}_{13}^* \\ 0 & \mathbf{A}_{22}^* & \mathbf{A}_{23}^* \\ 0 & 0 & \bar{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j)} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j+1)} \\ \mathbf{B}_{(j)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{\text{ion}(j)}^* \\ \mathbf{Z}_{W(j)}^* \\ \bar{\mathbf{Z}}_{B(j)} \end{bmatrix} \right\|^2 + \|\mathbf{e}\|^2 \quad (13)$$

其中, $\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11}^* & \mathbf{A}_{12}^* & \mathbf{A}_{13}^* & \mathbf{Z}_{\text{ion}(j)}^* \\ 0 & \mathbf{A}_{22}^* & \mathbf{A}_{23}^* & \mathbf{Z}_{W(j)}^* \end{bmatrix} = \mathbf{T}'' \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}}_{11} & 0 & \hat{\mathbf{A}}_{12} & \hat{\mathbf{Z}}_{\text{ion}(j)} \\ -\tilde{\mathbf{A}}_{W(j)} & \tilde{\mathbf{A}}_{W(j)} & 0 & \tilde{\mathbf{Z}}_{W(j)} \end{bmatrix}$

令 $\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11}^* & \mathbf{A}_{12}^* & \mathbf{A}_{13}^* \\ 0 & \mathbf{A}_{22}^* & \mathbf{A}_{23}^* \\ 0 & 0 & \bar{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j)} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j+1)} \\ \mathbf{B}_{(j)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{\text{ion}(j)}^* \\ \mathbf{Z}_{W(j)}^* \\ \bar{\mathbf{Z}}_{B(j)} \end{bmatrix} = 0$, 就可以求出 $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j+1)}$ 和 $\mathbf{B}_{(j)}$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j+1)} = (\mathbf{A}_{22}^*)^{-1} (\mathbf{Z}_{W(j)}^* - \mathbf{A}_{23}^* \mathbf{B}_{(j)}) \\ \mathbf{B}_{(j)} = \bar{\mathbf{A}}_{22}^{-1} \bar{\mathbf{Z}}_B \end{cases} \quad (14)$$

至此,基于参数分类求解思想已经求出 $\mathbf{B}_{(j)}$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j+1)}$,使用 \mathbf{A}_{22}^* , \mathbf{A}_{23}^* , $\bar{\mathbf{A}}_{22}$ 组成新先验观测方程,与下一历元的观测方程联立,即可实现 SRIF 的迭代算法。在 SRIF 之后,使用每一历元的 \mathbf{A}_{11}^* , \mathbf{A}_{12}^* , \mathbf{A}_{13}^* 就可以实现后向平方根信息平滑,求得平滑后的 $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ion}(j)}$ 。

3 实验分析

为了验证上述方法,模拟了 2013 年 1 月 1 日全天某站(39.609°N,115.892°E) R_1 , R_2 , Φ_1 , Φ_2 四类观测数据。模拟时设置采样间隔 30 s,截止高度角 15°;不加入周跳,模糊度和电离层延迟为 0,仅向数据中加入随机噪声;噪声水平按照伪距 0.3 m,载波相位 0.01 周确定。以 PRN 4 卫星为例,对其一天中的连续数据使用式(3)直接求解,每一历元的电离层延迟、L1 模糊度及对应的统计数据如图 1、图 2 及表 1 所示。

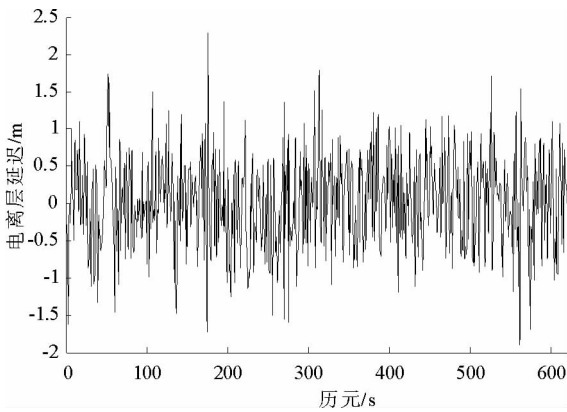


图 1 平滑前 PRN 4 卫星电离层延迟

Fig. 1 Direct solution of ionospheric delay for PRN 4

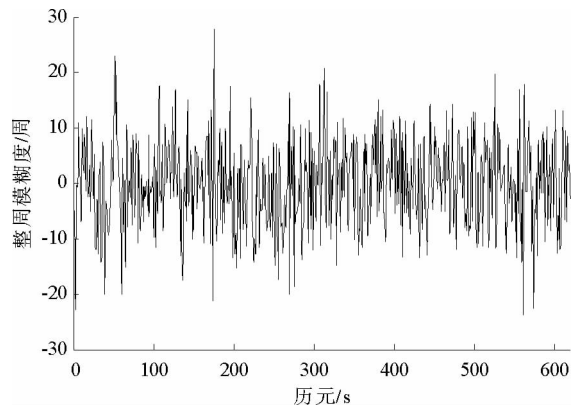


图 2 平滑前 PRN 4 卫星 L1 载波整周模糊度

Fig. 2 Direct solution of L1 ambiguity for PRN 4

表 1 平滑前 PRN 4 卫星未知参数统计结果

Tab. 1 Statistical results of direction solutions for PRN 4

	Max	Min	Mean	STD	RMS
电离层延迟/m	2.288	-1.894	0.021	0.639	0.639
L1 模糊度/周	27.812	-23.813	-0.185	7.937	7.939
L2 模糊度/周	27.534	-23.736	-0.279	7.863	7.868

从以上结果可以明显看出,对于理论值皆为 0 的两类未知参数,电离层延迟可达 2 m 以上,模糊度误差最大超过 20 周,均方根(root mean square, RMS)同样较大,偏离理论值,同时标准差(standard deviation,

STD)较大,说明结果稳定性不佳,离散程度较大。这就说明在不对数据进行分类解算的情况下,使用直接求解的方法将无法得到预期结果。

然后按照以上步骤对未知参数分类计算,使用动态 SRIF/S 算法对数据进行滤波和平滑之后,所得结果如图 3、图 4 及表 2。

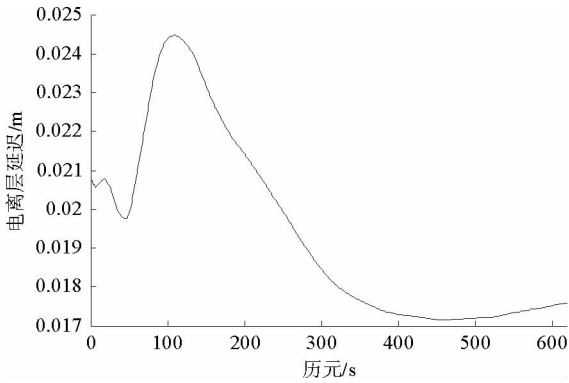


图 3 平滑后 PRN 4 卫星电离层延迟

Fig. 3 Classification solution of ionospheric delay for PRN 4

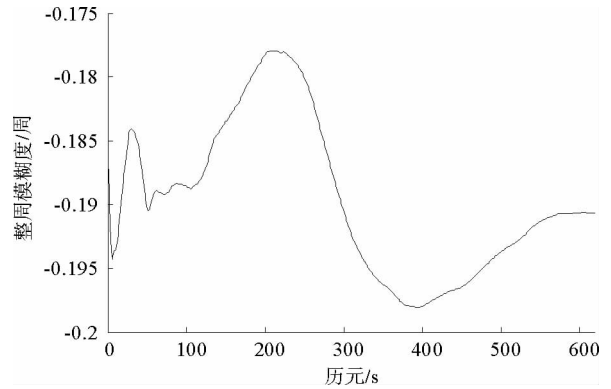


图 4 平滑后 PRN 4 卫星 L1 整周模糊度

Fig. 4 Classification solutions of L1 ambiguity for PRN 4

表 2 平滑后 PRN 4 卫星未知参数统计结果

Tab. 2 Statistical results of classification solutions for PRN 4

	Max	Min	Mean	STD	RMS
电离层延迟/m	0.024 5	0.017 2	0.019 4	0.000 1	0.019 5
L1 模糊度/周	- 0.178	- 0.198	- 0.190	0.009	0.190
L2 模糊度/周	- 0.253	- 0.328	- 0.297	0.023	0.297

从以上统计数据可以看出,两类未知参数的历元间波动不大,最大值和最小值也未偏离理论值超过一周,说明 SRIF/S 算法可以有效计算未知参数,并且在削弱随机噪声影响方面具有一定效果。为进一步验证算法的有效性,仍以 PRN 4 卫星为例,向其模拟数据中加入一定大小的整周模糊度,L1 载波加入 10 500 周,L2 载波加入 1 周,计算结果如图 5、图 6 及表 3。

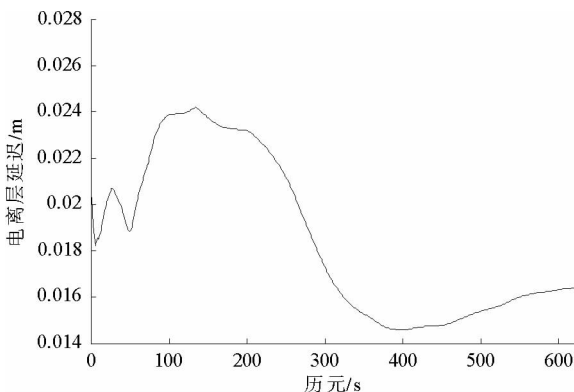


图 5 PRN 4 卫星模糊度非零时平滑后电离层结果

Fig. 5 Classification solution of ionospheric delay for PRN 4 with higher degree of ambiguity

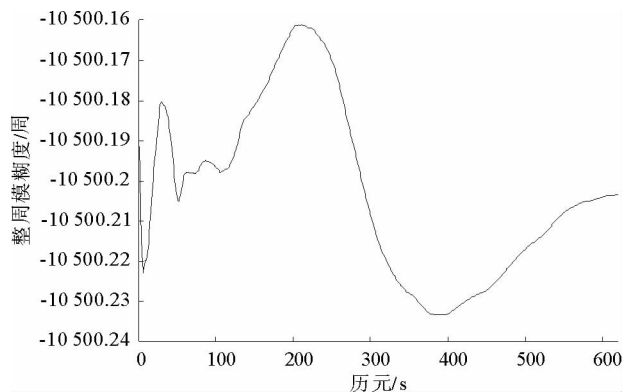


图 6 PRN 4 卫星平滑后 L1 整周模糊度(理论值 10 500 周)

Fig. 6 Classification solution of L1 ambiguity for PRN 4 with true value of 10 500 cycles

表 3 加入模糊度平滑后 PRN 4 卫星未知参数统计结果

Tab. 3 Statistical results of classification solutions for PRN 4 with more ambiguities

	Max	Min	Mean	STD	RMS
电离层延迟/m	0.024	0.015	0.019	0.003	0.019
L1 模糊度/周	- 10 500.161	- 10 500.233	- 10 500.203	0.022	10 500.203
L2 模糊度/周	- 1.253	- 1.328	- 1.297	0.023	1.297

从加入模糊度后解算结果的统计数据来看,三种待求参数同样距离理论值很接近,并且数值波动并不剧烈。对于模糊度为 10 500 周和 1 周的 L1、L2 观测数据,RMS 分别为 10 500.203 周和 1.297 周,STD 为 0.022 和 0.023,此时使用直接取整的方法就可以较好地固定模糊度,同时电离层延迟的计算结果并未受到整周模糊度的改变而产生变化,这说明参数分类解算具有一定效果。

4 结束语

通过模拟实验数据结果,将参数分类思想与 SRIF/S 算法相结合,电离层延迟和整周模糊度这两类参数的原始性质被较好地保留,观测噪声对解算结果的影响也被降低,说明该方法有效。实际中由于卫星信号失锁以及各种环境因素的影响,周跳和观测噪声同时存在^[19],若观测噪声较大,则小的周跳就会被掩盖,造成结果出现一定偏差,因此使用合理的周跳探测与修复技术获得“干净的”观测值是进行参数求解的前提条件,这是在今后工作中需要讨论和研究的重点问题。

参考文献:

[1]李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005:58-59.

[2]涂锐. GPS 单频精密单点定位与区域电离层模型研究[D]. 西安:长安大学,2011:25.

[3]Guo J Y, Han Y B, Chang X T. A new method of ionospheric-free hybrid differential positioning based on a double-antenna CAPS receiver[J]. Science in China Series G: Physics Mechanics & Astronomy, 2009, 52(3): 368-375.

[4]李征航,张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉:武汉大学出版社,2009:39.

[5]Xu G C. GPS Theory, Algorithms and Applications[M]. 2nd edition. Berlin: Springer, 2007: 98-100.

[6]袁运斌. 基于 GPS 的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所,2002:13-16.

[7]郭金运,黄金维,曾子榜,等. 基于 IGS 跟踪站的高频 GPS 卫星时钟改正确定[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2008,33(7): 706-710.

Guo Jinyun, Huang Jinwei, Zeng Zibang, et al. Determination of high-rate clock corrections for GPS satellites from observations of IGS stations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(7): 706-710.

[8]郭金运,常晓涛,刘新. 星载 GPS 观测数据预处理模型研究[J]. 测绘科学,2006,31(3):62-4.

Guo Jinyun, Chang Xiaotao, Liu Xin. Study on GPS data preprocessing models onboard satellite[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(3): 62-64.

[9]祝会忠. 网络 RTK 整周模糊度快速解算[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2008:9.

[10]Bierman G J. Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation[M]. New York: Academic Press, 1972: 12.

[11]Dyer P, McReynolds S. Extension of square-root filtering to include process noise[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1969, 3(6): 444-458.

[12]Kaminski P G, Bryson A E, Schmidt S F. Discrete square root filtering: A survey of current techniques[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1971, 16(6): 727-736.

[13]魏静,崔燕. 信息平方根滤波在提高寻北精度中的应用[J]. 弹箭与制导学报,2004,24(4):205-206.

Wei Jing, Cui Yan. Information square root filter and its application improving northfinder's accuracy[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004, 24(4): 205-206.

[14]Bierman G J. Square-root information filtering and smoothing for precision orbit determination[J]. Mathematical Programming Studies, 1982, 18: 61-75.

- [15] 赵齐乐,刘经南,葛茂荣,等. 均方根信息滤波和平滑及其在低轨卫星星载 GPS 精密定轨中的应用[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2006,31(1):12-15.
Zhao Qile,Liu Jingnan,Ge Maorong,et al. Applications of square-root information filtering and smoothing on orbit determination of LEO satellites with on-board GPS data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2006,31(1):12-15.
- [16] 王卫东,张泽旭,朱圣英,等. 一种小天体绕飞轨道及目标天体参数确定方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(9):19-24.
Wang Weidong,Zhang Zexu,Zhu Shengying,et al. An algorithm of around orbit and parameters determination for small body[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2011,43(9):19-24.
- [17] 阮仁桂,吴显兵,冯来平,等. 同时估计电离层延迟的单频精密单点定位方法[J]. 测绘学报,2012,41(4):490-495.
Ruan Rengui,Wu Xianbing,Feng Laiping,et al. Single-frequency precise point positioning with simultaneous ionospheric delay estimation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2012,41(4):490-495.
- [18] 阮仁桂. GPS 非差相位精密单点定位研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2009:21-28.
- [19] 李国伟,郭金运,王书阳,等. 基于动态单点定位的 GPS 数据质量指标研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2013,32(3):89-94,104.
Li Guowei,Guo Jinyun,Wang Shuyang,et al. GPS data quality indicators based on kinematic point positioning[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science, 2013,32(3):89-94,104.

(责任编辑:高丽华)

“测绘·遥感·信息”研究专栏征稿

征稿范围:

- ◇ 航空航天摄影测量
- ◇ 遥感影像信息处理
- ◇ 精密空间定位
- ◇ 海岛(礁)测绘
- ◇ 地球空间信息系统
- ◇ 3S 集成与空间信息服务
- ◇ 精密工程测量与工业测量
- ◇ 多媒体通讯技术

欢迎相关领域专家学者和工程技术人员踊跃投稿,来稿请注明“测绘遥感信息”研究专栏。稿件通过专家评审后优先发表,优稿优酬。

投稿平台:http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱:zkglhxx@163.com,glhxx@163.com

联系电话:0532-86057859

山东科技大学学报(自然科学版)编辑部