

基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理

赖育网, 谷德峰, 姚 静, 易东云
(国防科学技术大学理学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对星载双频 GPS 数据预处理中的野值剔除和周跳检测问题, 提出了基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理方法。与传统 GPS 数据预处理方法在数据利用上局限于 GPS 原始观测数据本身不同, 该方法还利用了动力学定轨产生的先验轨道信息以及 GPS 卫星精密轨道、钟差数据, 并构造接收机钟差估计量和接收机钟差差分估计量来剔除野值和探测周跳, 提高了野值剔除和小周跳探测能力。对 CHAMP 卫星在轨实测数据的处理分析表明, 该方法可以探测出 1 周甚至 0.5 周的周跳, 可为高精度定轨提供更“干净”的数据源。

关键词: GPS 数据预处理; 周跳检测; 动力学轨道

中图分类号: P228.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2011)12-2510-08

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.12.007

Satellite-Borne Dual Frequency GPS Data Pre-Processing Base on a Priori Dynamics Orbit

LAI Yu-wang, GU De-feng, YAO Jing, YI Dong-yun
(School of Science, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the problem of outlier deletion and cycle-slip detection in satellite-borne dual frequency GPS data pre-processing, a new satellite-borne dual frequency GPS data pre-processing method base on a priori dynamics orbit is proposed. Compared with the traditional GPS data pre-processing method only using the GPS observation data, this method also make use of a priori dynamics orbit and the precise orbit /clock data of GPS satellite to construct estimations of the receiver clock error and the receiver clock error difference in outlier deletion and cycle-slip detection, so it can improve the ability of outlier deletion and cycle-slip detection. Experiments are carried out by using real data of CHAMP to test the method. It's shown that this method can detect 1 and 0.5 cycle slip, so it can provide cleaner data for high accuracy orbit determination.

Key words: GPS data pre-processing; Cycle-slip detection; Dynamics orbit

0 引 言

随着空间技术及 GPS 技术的快速发展, 星载双频 GPS 已成为低轨卫星精密定轨/定位的主要手段之一^[1,4]。在星载 GPS 接收机动态测量过程中, 受多个跟踪通道偶然因素的影响, 观测资料中往往包含异常点, 异常点的存在会严重影响精密轨道确定结果。因此, 在进行星载 GPS 精密定轨之前, 首先

要进行 GPS 原始观测数据预处理。GPS 数据预处理的主要任务是剔除伪码和载波相位中的野值、探测载波相位中的周跳。其中, 周跳对确定卫星状态的影响更大, 数值实验表明, 人为增加或减少一个周跳将对定位结果产生分米级影响^[5]。因此, 正确探测周跳是提高定轨/定位精度的前提条件。

目前, 周跳探测方法主要包括: 差分法^[6]、多项式拟合法^[7]、M-W 组合法^[8]、电离层残差法^[9]以及

Blewitt 提出的 TurboEdit 方法^[10]等。这些方法在地面静态 GPS 数据预处理中是比较有效的,但对于高动态环境下的星载双频 GPS 数据预处理,这些方法的应用受到了限制^[11]。首先这些方法只能探测一些较大的周跳,对于 5 周以下的小周跳还不能有效探测;此外,如果两个频率的载波相位数据同时发生相同的周跳,则任何基于 M-W 组合的方法均无法探测。文献[11]和文献[12]对 TurboEdit 方法进行了改进,其 GRACE A 卫星仿真结果表明能够探测出 2 周左右的单个频率发生的周跳,但对 1 周周跳探测的效果并不明显,且该方法是基于 M-W 组合的,故该方法无法探测两个频率同时发生的相同的周跳。近来有些学者研究了利用小波分析来探测周跳的方法,在一定程度上提高了周跳探测的有效性,但该方法在探测小周跳时易产生边缘效应,导致无法准确定位周跳发生的历元,特别是对 1 周左右的小周跳还不能有效探测^[13-20]。另外,若这些小波分析方法是基于 M-W 组合的,则不能探测出两个频率载波相位数据同时发生的相同的周跳。

对这些传统的周跳探测方法进行仔细分析可以发现,在进行周跳探测时,这些方法都是从双频 GPS 原始观测数据本身出发,通过利用伪码观测数据和相位观测数据构造不同的组合来进行周跳探测,利用的数据仅仅局限于双频 GPS 原始观测资料,其周跳探测能力往往受限于星载双频 GPS 原始观测数据特别是伪码观测数据的质量,难以保证周跳探测结果的有效性和可靠性。为了给后续的高精度定轨/定位提供更“干净”的数据源,本文研究了一种新的 GPS 数据预处理方案,并提出一种新的星载双频 GPS 数据预处理方法:基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理方法。该方案首先采用传统的 GPS 数据预处理方法对星载双频 GPS 原始观测数据进行预处理,得到初步的预处理数据文件;然后进行非差动力学定轨,得到一条连续光滑的动力学轨道;最后根据得到的动力学轨道,并结合 GPS 卫星精密轨道和 GPS 卫星钟差数据,采用基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理方法对星载双频 GPS 原始观测数据进行预处理。与以往 GPS 数据预处理方法的不同之处在于,该方法在数据的利用上没有局限于双频 GPS 原始观测资料,而是还引入了动力学定轨产生的先验轨道信息以及

GPS 卫星精密轨道、钟差数据,通过构造接收机钟差估计量和接收机钟差差分估计量来降低原始观测数据误差的影响,达到提高野值剔除和周跳探测能力的目的。

1 先验动力学轨道的产生

在利用基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理方法进行野值剔除和周跳探测之前,先要获得一条先验动力学轨道。为此,先采用传统的方法对星载双频 GPS 观测数据进行预处理,其中伪码野值剔除采用电离层组合法以及抗差 Vondrak 滤波方法,载波相位的野值剔除和周跳探测采用 M-W 组合法以及消电离层组合法^[5,21],为后面的动力学定轨提供初步的数据预处理文件;然后进行非差动力学定轨(动力学定轨原理可参见文献[21-24]),得到一条连续光滑的动力学轨道。本文在非差动力学定轨过程中所采用的动力学模型及参数信息见表 1。

表 1 动力学定轨过程中选用的模型及参数
Table 1 Models and parameters used for dynamic orbit determination

模型项	描述
地球引力场	GGM02C 200 × 200
固体潮	IERS96, 4 × 4
极潮	IERS96
海潮	CSR4.0
第三体摄动	太阳、月球
太阳光压	ball 模型, 光压系数 CR 待估
大气阻力	Jacchia71, 大气阻力系数 CD 待估
相对论摄动	仅考虑 Schwarzschild 项
周期性 RTN 摄动	分段估计 $C_r, S_r, C_t, S_t, C_n, S_n$
岁差章动	IAU1980, IERS96
地球自转参数	EOPC04
太阳历	DE405

图 1 是作者采用自主开发的卫星精密定轨软件对 2006 年 1 月 29 日至 2 月 4 日 7 天时间内 CHAMP 卫星的在轨实测数据进行非差动力学定轨的结果与 GFZ 科学轨道比对残差均方根。平均: R 方向 5.10cm、T 方向 8.41cm、N 方向 7.63cm、三维 12.54cm,每天的定轨精度基本保持稳定。

2 基于先验动力学轨道的双频 GPS 数据预处理方法

2.1 基本观测模型与消电离层组合

双频 GPS 观测数据主要包括:载波相位 L_1, L_2 ,

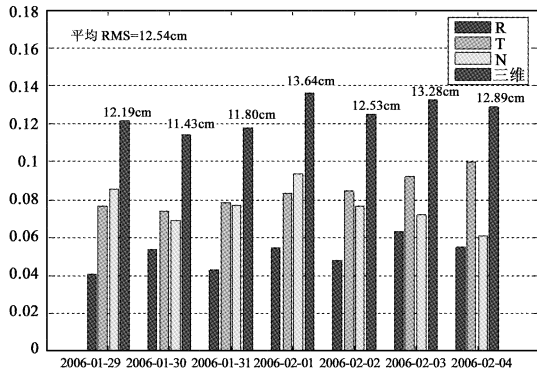


图 1 非差动力学定轨结果和 GFZ 精密轨道
对比残差均方根

Fig. 1 RMS of comparison between un-difference dynamic
POD results and the precise interstellar calendar by GFZ

伪码 P_1, P_2 码。它们的基本观测模型可表示为：

$$\begin{aligned} P_1^j &= \rho_r^j + c(\Delta t_r - \Delta t^j) + I^j + \varepsilon_{P_1}^j \\ P_2^j &= \rho_r^j + c(\Delta t_r - \Delta t^j) + \alpha I^j + \varepsilon_{P_2}^j \\ L_1^j &= \rho_r^j + c(\Delta t_r - \Delta t^j) + \lambda_1 N_1^j - I^j + \varepsilon_{L_1}^j \\ L_2^j &= \rho_r^j + c(\Delta t_r - \Delta t^j) + \lambda_2 N_2^j - \alpha I^j + \varepsilon_{L_2}^j \end{aligned} \quad (1)$$

式中 j 为 GPS 卫星号, ρ_r^j 为接收天线相位中心到 GPS 卫星 j 发射天线相位中心的真实几何距离, Δt_r 为接收机钟差, Δt^j 为 GPS 卫星 j 钟差, α 是描述电离层延迟和两个频率关系的因子, $\alpha = f_1^2/f_2^2$, I^j 为频率 f_1 的电离层延迟, λ_1, λ_2 为载波波长, N_1^j, N_2^j 为相位整周模糊度, ε_{\square}^j 为观测误差的总和, 主要包括多路径误差、热测量噪声、通道延迟和电子信号干扰等, 下标 \square 代表任一观测类型。由于卫星的轨道高度一般远高于对流层的高度 (50km 以下), 因此观测方程中不包括对流层延迟。

根据基本观测模型, 双频伪码和相位消电离层组合观测值可表示为:

$$\begin{aligned} P_{IF,r}^j(t_i) &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1^j - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2^j \\ &= \rho_r^j(t_i) + c(\Delta t_r(t_i) - \Delta t^j(t_i)) + \varepsilon_{P_{IF,r}}^j(t_i) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} L_{IF,r}^j(t_i) &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1^j - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2^j \\ &= \rho_r^j(t_i) + c(\Delta t_r(t_i) - \Delta t^j(t_i)) + \lambda_{IF} A_{IF}^j(t_i) + \varepsilon_{L_{IF}}^j(t_i) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 P_{IF} 为 P_1, P_2 的消电离层伪码组合观测值; L_{IF}

为 L_1, L_2 的消电离层相位组合观测值 (距离); $\lambda_{IF} A_{IF} = (\lambda_1 N_1 f_1^2 - \lambda_2 N_2 f_2^2) / (f_1^2 - f_2^2)$ 为消电离层相位组合观测值的模糊度; $\varepsilon_{P_{IF,r}}^j$ 为伪码消电离层组合误差, $\varepsilon_{L_{IF}}^j$ 为相位消电离层组合误差, $c\varepsilon_{\Delta t^j}$ 为 GPS 卫星钟差误差。

2.2 伪码野值剔除方法

在每个时刻, 利用先验动力学轨道获得较为准确的 GPS 接收机位置, 结合 GPS 卫星精密轨道、钟差数据可计算出接收机到 GPS 卫星 j 的几何距离 ρ_r^j 。根据式 (2), 这一几何距离与伪码消电离层组合观测值、GPS 卫星精密钟差联合起来可确定 GPS 接收机钟差参数 $c\Delta t_r(t_i)$ 。设 t_i 时刻的可视 GPS 卫星数为 n , 当 $n \geq 2$ 时, 可得到 t_i 时刻的接收机钟差估计:

$$c\Delta t_r(t_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_{IF,r}^j(t_i) - (\rho_r^j(t_i) - c\Delta t^j(t_i))) \quad (4)$$

其中 $j = 1, 2, \dots, n$ 。

计算钟差残差:

$$\begin{aligned} res_r^j(t_i) &= P_{IF,r}^j(t_i) - (\rho_r^j(t_i) + c\Delta t_r(t_i) - c\Delta t^j(t_i)) \\ &= \frac{n-1}{n} (P_{IF,r}^j(t_i) - (\rho_r^j(t_i) - c\Delta t^j(t_i))) - \\ &\quad \frac{1}{n} \sum_{k \neq j}^n (P_{IF,r}^k(t_i) - (\rho_r^k(t_i) - c\Delta t^k(t_i))) \end{aligned} \quad (5)$$

设钟差残差的阈值为 T_p , 如果 $\max_{1 \leq j \leq n} |res_r^j(t_i)| > T_p$, 则判定 t_i 时刻残差最大值对应的伪码观测值为野值。当某个通道发现野值时, 将此野值排除, 然后按照式 (4) 和式 (5) 重新计算接收机钟差估计和钟差残差, 再根据 $\max_{1 \leq j \leq n} |res_r^j(t_i)| > T_p$ 来判断其它通道是否还存在野值, 依此类推进行重复处理, 直到检测出同一个时刻的所有野值。当可视卫星数 $n < 2$ 时, 本方法将直接判为野值。由这种方法确定的 GPS 接收机钟差在后续的高精度绝对定轨和相对定位过程中可以作为先验值。

2.3 载波相位的野值剔除和周跳探测方法

因为载波相位偏差随时间为常数, 因此, 与伪码野值剔除类似的过程, 突然的周跳可以通过对连续时间 t_i 和 t_{i-1} 的载波相位观测数据差分进行探测, 此时取代钟差的是两个连续时刻的钟差差分。设 t_i 时刻的可视 GPS 卫星数为 n , 当 $n \geq 2$ 时, 由式 (3) 得到连续时间 t_i 和 t_{i-1} 间的接收机钟差差分估计:

$$c\Delta t_r(t_{i-1}, t_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (L_{IF,r}^j(t_{i-1}, t_i) - (\rho_r^j(t_{i-1}, t_i) - c\Delta t^j(t_{i-1}, t_i) + \lambda_{IF} A_{IF}^j(t_{i-1}, t_i))) \quad (6)$$

其中 $j = 1, 2, \dots, n$ 。

对应的残差为:

$$\begin{aligned} \text{res}_r^j(t_{i-1}, t_i) = & \frac{n-1}{n} (L_{IF,r}^j(t_{i-1}, t_i) - (\rho_r^j(t_{i-1}, t_i) - \\ & c\Delta t^j(t_{i-1}, t_i) + \lambda_{IF} A_{IF}^j(t_{i-1}, t_i))) - \\ & \frac{1}{n} \sum_{k \neq j}^n (L_{IF,r}^k(t_{i-1}, t_i) - (\rho_r^k(t_{i-1}, t_i) - \\ & c\Delta t^k(t_{i-1}, t_i) + \lambda_{IF} A_{IF}^k(t_{i-1}, t_i))) \quad (7) \end{aligned}$$

对于一段连续跟踪数据,若载波相位观测数据未发生周跳,则消电离层相位组合模糊度 $\lambda_{IF} A_{IF}^j$ 为固定值,于是有:

$$\begin{aligned} \lambda_{IF} A_{IF}^j(t_{i-1}, t_i) = & (\lambda_1 \Delta N_1 f_1^2 - \lambda_2 \Delta N_2 f_2^2) / \\ & (f_1^2 - f_2^2) = 0 \end{aligned}$$

设钟差差分残差的阈值为 T_L ,如果

$$\begin{aligned} \sigma(\text{res}_r(t_i)) \approx & \left\{ \left(\frac{n-1}{n} \right)^2 (\sigma^2(\varepsilon_{P_{IF,r}}) + \sigma^2(\varepsilon_\rho) + (c\sigma(\Delta t))^2) + \frac{n-1}{n^2} (\sigma^2(\varepsilon_{P_{IF,r}}) + \sigma^2(\varepsilon_\rho) + (c\sigma(\Delta t))^2) \right\}^{1/2} \\ = & \left\{ \frac{(n-1)}{n} \left(\frac{f_1^4 + f_2^4}{(f_1^2 - f_2^2)^2} \sigma^2(P) + \sigma^2(\rho) + (c\sigma(\Delta t))^2 \right) \right\}^{1/2} \\ \approx & 91.6 \sqrt{\frac{n-1}{n}} \text{ cm} \quad (8) \end{aligned}$$

设载波相位的观测噪声大小为 $\sigma(L) = 2\text{mm}$, 轨道差分精度为 $\sigma(\rho(t_{i-1}, t_i)) = 1\text{cm}$, GPS 卫星钟差差分精度为 $\sigma(\Delta t(t_{i-1}, t_i)) = 75\text{ps}$, 类似式(8)的推导,由式(3)和式(7)可推出相位观测噪声、先

$$\begin{aligned} \sigma(\text{res}_r(t_{i-1}, t_i)) \approx & \left\{ \frac{(n-1)}{n} \left(2 \frac{f_1^4 + f_2^4}{(f_1^2 - f_2^2)^2} \sigma^2(L) + \sigma^2(\rho(t_{i-1}, t_i)) + (c\sigma(\Delta t(t_{i-1}, t_i)))^2 \right) \right\}^{1/2} \\ \approx & 2.60 \sqrt{\frac{n-1}{n}} \text{ cm} \quad (9) \end{aligned}$$

这里取 $\sigma(\rho(t_{i-1}, t_i)) = 1\text{cm}$ 是由非差动力学定轨所保证的。根据非差动力学定轨原理,先验动力学轨道相邻的两个点之间并非是独立的,而是有关联的。先验轨道经过差分,公共的误差大部分被消除掉,因此先验动力学轨道经过差分后精度得到了极大提高。根据作者对大量在轨实测数据的处理发现,轨道差分精度优于 1cm 。而由于接收机钟差变

$\max_{1 \leq j \leq n} |\text{res}_r^j(t_{i-1}, t_i)| > T_L$, 则判定 t_i 时刻残差最大值对应的载波相位观测值为异常点。实际处理时需要重复处理,直到检测出同一个时刻的所有异常点。异常点包括野值和周跳, t_i 时刻周跳的探测条件为:

$$|\text{res}_r^j(t_{i-1}, t_i)| > T_L \text{ 且 } |\text{res}_r^j(t_i, t_{i+1})| < T_L$$

野值的探测条件为:

$$|\text{res}_r^j(t_{i-1}, t_i)| > T_L \text{ 且 } |\text{res}_r^j(t_i, t_{i+1})| > T_L$$

2.4 阈值选取与周跳探测能力分析

设双频 P 码的观测噪声大小为 $\sigma(P) = 30\text{cm}$, 先验动力学轨道的精度为 $\sigma(\rho) = 20\text{cm}$, GPS 卫星钟差的精度为 $\sigma(\Delta t) = 75\text{ps RMS}$ (IGS 发布的 GPS 精密钟差的精度, 采样间隔 5min), 取光速 $c = 299792458\text{m/s}$, 算得 $c\sigma(\Delta t) \approx 2.25\text{cm}$, 根据误差传递关系(这里假定各种误差是相互独立的), 由(2)和(5)式可近似推出伪码观测噪声、先验动力学轨道的精度、GPS 卫星钟差的精度与接收机钟差残差 $\text{res}_r(t_i)$ 误差大小之间的传递关系:

验动力学轨道的精度、GPS 卫星钟差的精度与接收机钟差差分的残差 $\text{res}_r(t_{i-1}, t_i)$ 误差大小之间的传递关系:

化是比较无规则性的, 这里仍取 $\sigma(\Delta t(t_{i-1}, t_i)) = \sigma(\Delta t) = 75\text{ps}$ 。

采用 3σ 原则, 取 $T_p = 2.75 \sqrt{(n-1)/n} \text{ m}$, $T_L = 7.8 \sqrt{(n-1)/n} \text{ cm}$, 其中 n 由实际可视 GPS 卫星数而定。

下面分析基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理方法的周跳探测能力。

考虑接收机对单颗 GPS 卫星发生周跳的情形, 假设在 t_i 时刻接收机对某颗 GPS 卫星 j 的载波相位观测数据发生了周跳, 则消电离层相位组合模糊度 $\lambda_{IF}A_{IF}^j(t_i)$ 会发生变化, 此时:

$$\lambda_{IF}A_{IF}^j(t_{i-1}, t_i) = (\lambda_1 \Delta N_1^j f_1^2 - \lambda_2 \Delta N_2^j f_2^2) / (f_1^2 - f_2^2) \neq 0$$

由式(7), $\text{res}_r^j(t_{i-1}, t_i)$ 的值将随之发生突变。记

$$\Delta L_1 \triangleq \lambda_1 f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) \approx 48.44 \text{cm},$$

$$\Delta L_2 \triangleq \lambda_2 f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \approx 37.75 \text{cm}$$

表 2 不同周跳组合对应的消电离层相位组合模糊度差分值

Table 2 Difference values of phase ionosphere free combination ambiguity corresponding to different cycle slip combinations

$(\Delta N_1, \Delta N_2)$	(1,0)	(0,1)	(1,1)	(0.5,0)	(0,0.5)	(0.5,0.5)
$\lambda_{IF}A_{IF}^j(t_{i-1}, t_i)/\text{cm}$	48.44	37.75	10.70	24.22	18.87	5.35

由表 2 可见, 当某个频率的载波相位发生周跳或者 L_1 、 L_2 载波相位数据同时发生相同的周跳时, 即使只有 1 周甚至 0.5 周, 都会使 $\lambda_{IF}A_{IF}^j(t_{i-1}, t_i)$ 值的发生较大的改变, 在阈值取 $T_L = 7.8 \sqrt{(n-1)/n}$ cm 的条件下, 此时易满足: $|\text{res}_r(t_{i-1}, t_i)| > T_L$, 即这些周跳能够被探测出来。

当接收机对多颗或所有 GPS 卫星同时发生周跳时, 可通过迭代进行处理。需要说明, 当接收机对所有 GPS 卫星同时发生相同的周跳时, 本文方法不再适用。

3 算例分析

本文的研究平台为卫星精密定轨软件。该软件主要用于 GPS、SLR、无线电等测量数据处理、卫星精密定轨、地球重力场反演等科学技术研究, 为研究者提供所需的数据解析、坐标变换、轨道积分、定轨解算等基本算法, 可大大缩短研究周期, 提高研究成果的可信度。

本文充分利用卫星精密定轨软件对 CHAMP 卫星的实测数据进行基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理试验, 以检验该方法在星载双频 GPS 数据预处理中的正确性和有效性。具体处理过程: 首先提取接收机对某颗 GPS 卫星的一次连续跟踪数据, 在该连续跟踪弧段某个历元的载波相位数据中加上周跳; 然后采用基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理方法对加周跳后的 GPS 观

则有:

$$\lambda_{IF}A_{IF}^j(t_{i-1}, t_i) = \Delta N_1^j \Delta L_1 - \Delta N_2^j \Delta L_2$$

根据式(7)可得:

$$\text{res}_r^j(t_{i-1}, t_i) \approx \frac{n-1}{n} \lambda_{IF}A_{IF}^j(t_{i-1}, t_i) \pm \sigma(\text{res}_r(t_{i-1}, t_i)) \quad (10)$$

表 2 给出了几组典型的小周跳组合 ($\Delta N_1, \Delta N_2$) 对应的消电离层相位组合模糊度差分值 $\lambda_{IF}A_{IF}^j(t_{i-1}, t_i)$ 。

测数据进行预处理。

取 CHAMP 卫星对 PRN05 卫星的 2006 年 2 月 2 日 9 时 27 分 0 秒(历元 3335)至 09 时 54 分 30 秒(历元 3500)的连续跟踪数据, 在第 3400 历元(对应时间 9 时 37 分 50 秒)载波相位数据上人为地加上 (1,0)、(0,1)、(1,1)、(0.5,0)、(0,0.5) 以及 (0.5,0.5) 不同周跳组合的周跳。采用基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理方法分别对加不同周跳组合后的数据进行预处理, 得到的接收机钟差差分残差序列如图 3 至图 7 所示。在历元 3399、3400 处, 可视 GPS 卫星有 10 颗, 对应的接收机钟差差分、接收机钟差差分残差值如表 3 所示。

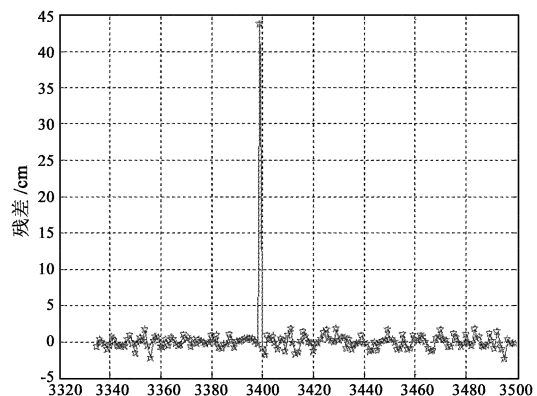


图 2 在 L_1 加 1 周周跳后接收机钟差差分残差序列

Fig. 2 Receiver clock error difference residuals with 1 cycle-slip added on L_1

表 3 历元 3399、3400 处接收机钟差差分、接收机钟差差分残差值

Table 3 The differential value and the difference residuals of the receiver clock error on epoch 3399, 3400

周跳组合	接收机钟差差分、接收机钟差差分残差值										
	共视 GPS 卫星	1	5	9	11	14	15	18	19	22	30
(1,0)	$c\Delta t_r^j(3399,3400)/m$	11.793	12.275	11.784	11.796	11.792	11.785	11.789	11.784	11.785	11.789
	$res_r^j(3399,3400)/cm$	-4.45	43.81	-5.33	-4.13	-4.55	-5.21	-4.83	-5.28	-5.24	-4.79
(0,1)	$c\Delta t_r^j(3399,3400)/m$	11.793	11.413	11.784	11.796	11.792	11.785	11.789	11.784	11.785	11.789
	$res_r^j(3399,3400)/cm$	4.16	-33.76	3.28	4.48	4.07	3.41	3.79	3.34	3.38	3.83
(1,1)	$c\Delta t_r^j(3399,3400)/m$	11.793	11.897	11.784	11.796	11.792	11.785	11.789	11.784	11.785	11.789
	$res_r^j(3399,3400)/cm$	-0.68	9.84	-1.56	-0.36	-0.77	-1.43	-1.01	-1.51	-1.46	-1.02
(0.5,0)	$c\Delta t_r^j(3399,3400)/m$	11.793	12.033	11.784	11.796	11.792	11.785	11.789	11.784	11.785	11.789
	$res_r^j(3399,3400)/cm$	-2.03	22.01	-2.91	-1.71	-2.13	-2.79	-2.41	-2.86	-2.081	-2.37
(0,0.5)	$c\Delta t_r^j(3399,3400)/m$	11.793	11.602	11.784	11.796	11.792	11.785	11.789	11.784	11.785	11.789
	$res_r^j(3399,3400)/cm$	2.28	-16.77	1.40	2.60	2.18	1.52	1.90	1.45	1.50	1.94
(0.5,0.5)	$c\Delta t_r^j(3399,3400)/m$	11.793	11.844	11.784	11.796	11.792	11.785	11.789	11.784	11.785	11.789
	$res_r^j(3399,3400)/cm$	-0.14	5.03	-1.02	0.18	-0.24	-0.90	-0.52	-0.97	-0.93	-0.48

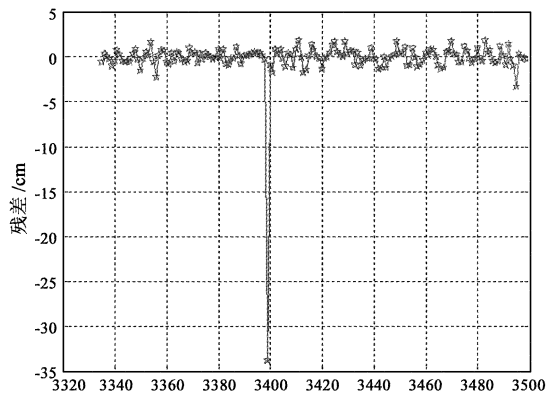


图 3 在 L_2 加 1 周周跳后接收机钟差差分残差序列
Fig.3 Receiver clock error difference residuals with 1 cycle-slip added on L_2

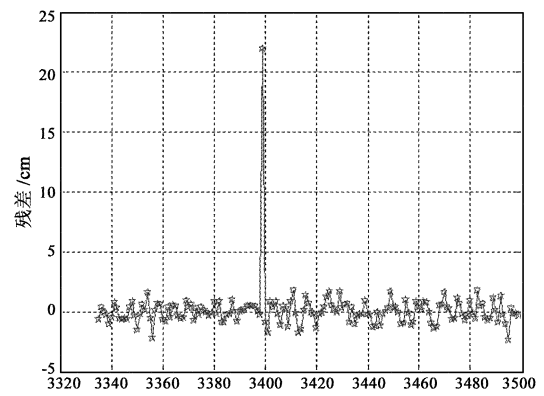


图 5 在 L_1 加 0.5 周周跳后接收机钟差差分残差序列
Fig.5 Receiver clock error difference residuals with 0.5 cycle-slip added on L_1

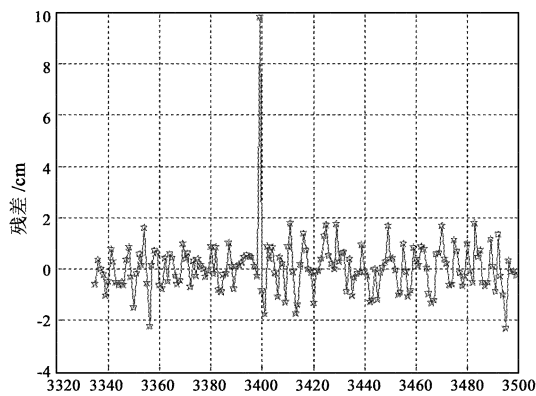


图 4 在 L_1 和 L_2 都加上 1 周周跳后接收机钟差差分残差序列
Fig.4 Receiver clock error difference residuals with 1 cycle-slip added on L_1 and L_2

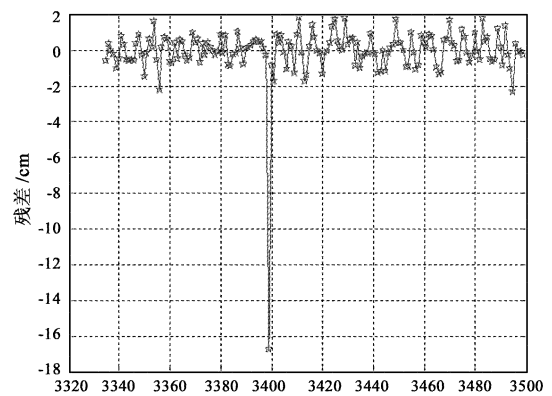


图 6 在 L_2 加 0.5 周周跳后接收机钟差差分残差序列
Fig.6 Receiver clock error difference residuals with 0.5 cycle-slip added on L_2

由表 3 可以看出,对应(1,0)、(0,1)、(1,1)、(0.5,0)、(0,0.5)以及(0.5,0.5) 6 种不同周跳组合, 分别有 $|res_r^j(3399,3400)| \approx 43.81cm$ 、

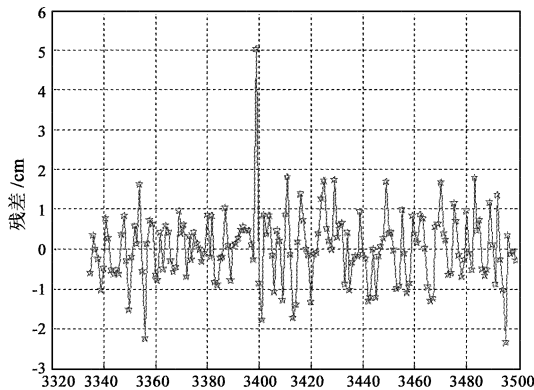


图 7 在 L_1 和 L_2 加上 0.5 周周跳后接收机钟差差分残差序列

Fig. 7 Receiver clock error difference residuals of GRACE A to PRN01 satellite with 0.5 cycle-slip added on L_1 and L_2

$| \text{res}_r^s(3399, 3400) | \approx 33.76\text{cm}$ 、 $| \text{res}_r^s(3399, 3400) | \approx 9.84\text{cm}$ 、 $| \text{res}_r^s(3399, 3400) | \approx 22.01\text{cm}$ 、 $| \text{res}_r^s(3399, 3400) | \approx 16.77\text{cm}$ 、 $| \text{res}_r^s(3399, 3400) | \approx 5.03\text{cm}$ ，而根据 2.4 节的讨论知：

$$T_L = 7.8 \sqrt{(n-1)/n} = 7.8 \sqrt{(10-1)/10} \approx 7.4\text{cm}$$

即对于单个频率载波相位数据发生 1 周、0.5 周周跳以及两个频率载波相位数据同时发生 1 周周跳的情形，本文的方法均能够准确探测出来。只有对两个频率载波相位数据同时发生 0.5 周周跳这种极端情形，本文方法没有探测出来。这说明利用基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理方法进行小周跳探测是比较准确和有效的，且该方法也克服了任何基于 M-W 组合的方法无法探测两个频率载波相位数据在同一时刻发生相同周跳的缺点。

4 结 论

根据本文提出的基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理方法，结合自主开发的卫星精密定轨软件，对 CHAMP 卫星在轨实测数据进行了基于先验动力学轨道的星载双频 GPS 数据预处理试验，试验结果表明：(1) 对于单个频率载波相位数据发生周跳的情形，本文方法能够准确探测出 1 周和 0.5 周的周跳；(2) 该方法能够准确探测出 1 周以上两个频率载波相位数据同时发生的相同的周跳。

通过构造接收机钟差估计量和钟差差分估计量提高周跳探测能力的关键有两点：引入先验动力

学轨道信息和未引入伪码观测数据。由于先验动力学轨道相邻点之间的相关性，先验动力学轨道经过历元间差分后精度得到了极大提高，避免了在构造接收机钟差差分估计量时引入大的轨道误差；在构造接收机钟差差分估计量来探测周跳时利用的是精度高得多的相位观测数据，而未引入精度低的伪码观测数据。这就使得构造出来接收机钟差差分估计量对周跳的探测具有非常高的灵敏度，从而提高小周跳探测的有效性和可靠性。对 CHAMP 卫星在轨实测数据的检验已经证明这一方法比传统的 GPS 数据预处理方法更加可靠和精确，能够为后面的高精度定轨和相对定位提供更“干净”的数据。

参 考 文 献

- [1] 秦显平, 杨元喜. LEO 星载 GPS 双向滤波定轨研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(2): 231-235. [Qin Xian-ping, Yang Yuan-xi. GPS-based orbit determination for LEO using bidirectional filter[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(2): 231-235.]
- [2] 秦显平, 杨元喜. 星载 GPS 的毫米级编队卫星相对定位[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 369-372. [Qin Xian-ping, Yang Yuan-xi. Millimeter-level relative positioning of formation flying satellites onboard GPS[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2): 369-372.]
- [3] 姚静, 易东云, 朱炬波. 基于 GPS 测量的编队飞行的主星轨道对星间基线确定的影响[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 537-542. [Yao Jing, Yi Dong-yun, Zhu Ju-bo. Influences of the master satellite orbit on the inter-satellite baseline determination for GPS-based formation flying satellite system[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(2): 537-542.]
- [4] 刘洋, 易东云, 王正明, 等. 基于双频 GPS 观测信息和星间距离测量的高精度星间相对定位方法[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 315-321. [Liu Yang, Yi Dong-yun, Wang Zheng-ming, et al. The high-precision inter-satellite relative positioning method based on measurement information of dual-frequency GPS and inter-satellite distance[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(2): 315-321.]
- [5] 郑作亚. GPS 数据预处理和星载 GPS 运动学定轨研究及其软件实现[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2005. [Zheng Zuo-ya. Study and software implementation of GPS data preprocessing and onboard GPS kinematic orbit determination[D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2005.]
- [6] Remondi B W. Performing centimeters relative surveying in seconds using GPS carrier phase: Initial results[J]. Navigation, 1985, 32(4): 386-400.

- [7] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2007:319-329.
- [8] 郑作亚, 程宗颐, 黄斌, 等. 对 Blewitt 周跳探测与修复方法的改进[J]. 天文学报, 2005, 46(2):217-224. [Zheng Zuo-ya, Cheng Zong-yi, Huang Cheng, et al. Improving of cycle-slip detection and correction of blewitt method[J]. Acta Astronomica Sinica, 2005, 46(2):217-224.]
- [9] 陈品馨, 章传银. 对电离层残差法多值性问题的研究[J]. 全球定位系统, 2009, 34(6):28-31. [Chen Pin-xin, Zhang Chuan-yin. Study for the multi-valued problem of the ionospheric remnant method of difference[J]. GNSS World of China, 2009, 34(6):28-31.]
- [10] Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 7(3):199-202.
- [11] 苗赢, 孙兆伟. 星载 GPS 测量数据周跳探测方法研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(2):521-525. [Miao Ying, Sun Zhao-wei. A cycle-slip detection method for satellite-borne GPS observation[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(2):521-525.]
- [12] Miao Y, Sun Z W, Wu S N. Error analysis and cycle-slip detection research on satellite-borne GPS observation[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2011, 24(1):95-101.
- [13] Rastbood A, Voosoghi B. Fixing of cycle slips in dual-frequency GPS phase observables using discrete wavelet transforms[J]. International Journal of Engineering: Transactions B: Applications, 2008, 21(1):9-26.
- [14] Elhabiby M, El-Ghazouly A, El-Sheimy N. Singularity detection technique for GPS cycle slip in wavelets domain[C]. 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute - of - Navigation (ION GNSS - 09), Savannah, GA, Sep 22-25, 2009.
- [15] Wang Y, Guo Z Z, Hu S W, et al. The detection of GPS cycle slips based on wavelet transform[C]. 2nd IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing, Qingdao, Aug 262-265, 2010.
- [16] Zheng Z Y, Liu X S, Du Z X. Constructing a type of new wavelet function and its application in GPS data pre-processing[J]. AVN, 2005(10):342-347.
- [17] 郑作亚, 卢秀山, 韩晓冬. 基于一类新小波函数基的 GPS 相位观测值周跳探测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(6):639-643. [Zheng Zuo-ya, Lu Xiu-shan, Han Xiao-dong. GPS phase measurement cycle-slip detection based on a new wavelet function[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(6):639-643.]
- [18] 王波, 张书毕, 李益斌, 等. 基于 GPS 相位观测值差分的小波变换在周跳探测中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2008, 31(6):114-116,119. [Wang Bo, Zhang Shu-bi, Li Yi-bing, et al. Application of cycle-slip detection of GPS phase observation based on wavelet transformation by difference[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2008, 31(6):114-116,119.]
- [19] 黄兵杰, 柳林涛, 高光星, 等. 基于小波变换的 GPS 精密单点定位中的周跳探测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(6):512-515. [Huang Bing-jie, Liu Lin-tao, Gao Guang-xing, et al. Detection of cycle-slip in the GPS precise point positioning based on wavelet transform[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(6):512-515.]
- [20] 伊廷华, 李宏男, 伊晓东, 等. 基于小波与神经网络的 GPS 周跳探测与修复[J]. 传感技术学报, 2007, 20(4):897-902. [Yi Ting-hua, Li Hong-nan, Yi Xiao-dong, et al. Cycle slip detection and correction of GPS carrier phase based on wavelet transform and neural network[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(4):897-902.]
- [21] 谷德峰. 分布式 InSAR 卫星系统的空间状态测量研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009. [Gu De-feng. Research on the spatial states measurement of distributed InSAR satellite system[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2009.]
- [22] Kroes R. Precise relative positioning of formation flying spacecraft using GPS[D]. Delft: Delft University of Technology, 2006.
- [23] 郑作亚, 蔡五三, 黄斌, 等. 星载 GPS 相位观测值非差运动学定轨探讨[J]. 天文学进展, 2005, 23(1):80-92. [Zheng Zuo-ya, Cai Wu-san, Huang Cheng, et al. Discussion on the kinematic orbit determination by the onboard GPS zero-differential phase observations[J]. Progress in Astronomy, 2005, 23(1):80-92.]
- [24] 吴江飞, 杜鹏, 王磊, 等. 星载 GPS 低轨卫星运动学定轨及研究进展[J]. 天文学进展, 2006, 24(2):113-128. [Wu Jiang-fei, Du Peng, Wang Lei, et al. Methods and progress on kinematic orbit determination of LEOs based on GPS[J]. Progress in Astronomy, 2006, 24(2):113-128.]

作者简介:赖育网(1983-),男,博士研究生,主要从事测量数据处理和卫星精密定轨研究。
通信地址:湖南长沙国防科技大学理学院四队(410073)
电话:13548682381
E-mail:system.qing.sci@163.com

(编辑:曹亚君)