

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.03.011

低采样率下北斗三频数据周跳探测与修复*

徐婷佳 鲁昌华 周娜 蒋薇薇

(合肥工业大学 计算机与信息学院 合肥 230009)

摘要:针对低采样率情况下电离层延时变化量增大,导致常规周跳探测方法无法达到较高精度的问题,提出了一种适用于低采样率的新方法。首先,通过无几何-无电离层载波相位组合和二次历元间差分的电离层残差组合求得周跳发生的历元;然后在该历元处选取两组无电离层伪距相位组合作为周跳第1、第2检测量,一组考虑电离层变化量的无几何组合作为第3检测量,构成3个线性无关的组合,对周跳进行修复;最后通过北斗三频实测数据对算法进行验证。实验表明,该方法对30 s采样间隔下的各种类型的周跳组合仍可以准确修复,且不存在盲点。该方法有效地减弱了采样率减小时,电离层延时变化量增大对周跳探测的影响,可适用于非动态、动态、非差数据的实时修复。

关键词:周跳;无几何-无电离层组合;电离层残差;伪距相位组合

中图分类号: P228.4; TN965.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Beidou triple-frequency cycle-slips detection and correction under low sampling rate

Xu Tingjia Lu Changhua Zhou Na Jiang Weiwei

(School of Computer and information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the problem that most conventional methods cannot achieve high precision when ionospheric delay variation increasing at low sampling rate, a new cycle-slip detection and correction method is proposed. Firstly, a geometry-free and ionosphere-free carrier phase combination (GIF), and a second-order time-difference phase ionospheric residual combination (STPIR) are integrated to detect the cycle-slips epochs. Then in these cycle-slips epochs, two ionosphere-free code-phase combinations are selected as the first and the second detectable amount respectively, and a geometry-free combination (GF), which ionospheric variation is taken into account, is selected as the third. These three combinations are composed linearly independently to find the values of cycle-slips. Finally, the experiment with BeiDou triple-frequency is given to verify the method. The experiment indicates that even in 30 s sampling intervals, the method can still detect different types of cycle-slip, especially insensitive cycle slips. This method can effectively reduce the effect of increasing ionospheric delay variation at low sampling rate, and be applied to dynamic, un-differenced observations.

Keywords: cycle-slip; geometry-free and ionosphere-free combination; ionospheric residual; code-phase combination

1 引言

快速准确的周跳探测和修复是北斗高精度定位的前提和关键^[1-3]。三频 GNSS 技术的发展,为周跳探测提供了长波长、小电离层延时和小观测噪声的多种组合技术,

促成了很多新方法^[4-8]。文献[9]指出,当采样间隔大于10 s时,忽略电离层影响的三频组合将会出现不能对周跳进行精确修复的情况。为此,很多学者提出了不同的解决办法。文献[4]提出,使用伪距-相位组合与无几何组合联合的探测法,文中使用弱电离层组合,并未完全消除电离层延时的影响,当电离层出现异常突变时,修复结

果将不理想。文献[5]提出一种无几何-电离层组合,该组合消除了电离层影响,但组合系数不为整数,使组合模糊度失去整数特性,易产生计算误差。文献[6]提出,利用伪距载波相位构成超宽巷、宽巷、窄巷组合,进行周跳探测的方法。该方法对盲点周跳的探测,采用了电离层延时变化量之间的求差,由于实际差值很小,易受观测噪声的影响,探测效果并不理想。

本文提出的方法是,先通过三频无几何-无电离层载波相位组合,探测周跳发生的历元,该组合不受一阶电离层影响,且具有更小的观测噪声;再采用二次历元间差分的电离层残差组合,探测盲点周跳发生的历元,然后在已知周跳发生历元的情况下,采用无电离层伪距相位组合,和考虑电离层变化量的无几何组合,共同探测修复周跳值。

2 北斗三频数据周跳探测与修复原理

2.1 基本观测方程

北斗载波相位和测码伪距基本观测方程可表示如下:

$$\begin{cases} \Phi_i = \rho - \theta_{1i}I + \lambda_i N_i + \varepsilon_{\Phi_i} \\ P_i = \rho + \theta_{1i}I + \varepsilon_{P_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i=1,2,3$ 表示北斗3个频率, Φ_i 和 P_i 分别是北斗的 B_i 频点上的载波相位和测码伪距观测值,单位为m; λ_i 为 B_i 上的波长; ρ 是卫星和接收机之间的距离,它还包括接收机和卫星的钟差、对流层延迟、硬件延迟等; I 为 B_1 频点上电离层延迟误差,单位为m; $\theta_{1i} = f_1^2/f_i^2$ 电离层比例因子, N_i 为相位整周数(单位为周); ε_{Φ_i} 和 ε_{P_i} 分别为载波相位和伪距观测噪声。本文假设北斗3个频点的原始观测噪声独立同分布,满足高斯分布,且 $\sigma_{\Phi_1} = \sigma_{\Phi_2} = \sigma_{\Phi_3} = 0.002$ m, $\sigma_{P_1} = \sigma_{P_2} = \sigma_{P_3} = 0.3$ m;由于多径效应误差无法通过高斯分布表示,难以建立有效的数学模型,且在相邻历元间做差时可以减弱其影响,故本文忽略多径效应的影响。

2.2 三频载波相位组合周跳历元探测

根据三频组合理论^[10-12],记组合系数分别为 α, β, γ ,忽略二阶项电离层延迟,北斗三频载波相位组合可以记为:

$$\begin{aligned} \Phi &= \alpha\Phi_1 + \beta\Phi_2 + \gamma\Phi_3 = (\alpha + \beta + \gamma)\rho - \\ &(\alpha + \theta_{12} + \theta_{13}\gamma)I_1 + (\alpha\lambda_1 N_1 + \beta\lambda_2 N_2 + \gamma\lambda_3 N_3) + \\ &(\alpha\varepsilon_{\Phi_1} + \beta\varepsilon_{\Phi_2} + \gamma\varepsilon_{\Phi_3}) \end{aligned} \quad (2)$$

为构建无几何-无电离层组合,式(2)满足:

$$\begin{cases} \alpha + \beta + \gamma = 0 \\ \alpha + \theta_{12}\beta + \theta_{13}\gamma = 0 \\ \alpha = 1 \end{cases} \quad (3)$$

计算可得 $\alpha = 1, \beta = 3.2577, \gamma = -4.2577$ 。

将 α, β, γ 代入式(2),并在相邻历元间求差,当有周跳发生时,得到无几何无电离层组合探测量:

$$\Delta\Phi_{IF} = \alpha\lambda_1\Delta N_1 + \beta\lambda_2\Delta N_2 + \gamma\lambda_3\Delta N_3 + \varepsilon_{\Delta\Phi} \quad (4)$$

由式(4)可知,无几何无电离层组合探测不受站星距离、钟差、电离层延迟影响,仅受可能的周跳和观测噪声影响,可用于动态非差情况下的周跳探测。由误差传播定律可得式(4)的标准差 $\sigma_{\Delta\Phi}$ 可表示为:

$$\sigma_{\Delta\Phi} = \sqrt{2} \sqrt{(\alpha\lambda_1)^2 + (\beta\lambda_2)^2 + (\gamma\lambda_3)^2} \sigma_{\Phi_i} \quad (5)$$

记探测阈值为 $\eta\sigma_{\Delta\Phi}$, η 为常数,通常取3(99.7%置信水平)或4(99.9%置信水平),本文中取 $\eta = 3$ 。

因此,一般情况下,当满足下面的不等式(6)时,可认为当前时刻发生了周跳:

$$|\Delta\Phi_{IF}| = |\Phi_{IF}(t) - \Phi_{IF}(t+1)| \geq \eta\sigma_{\Delta\Phi} \quad (6)$$

然而,当3个载波相位上发生同等大小的小周跳时,即 $\Delta N_1 = \Delta N_2 = \Delta N_3 = K, K = -10 \sim 10$ 的整数时, $|\Delta\Phi|$ 会小于探测阈值,无几何-无电离层载波相位组合就无法探测周跳发生的历元。

对于盲点周跳,本文借鉴文献[13],选取二次历元间差分的电离层残差组合探测周跳。文献[13]指出,两次差分后,即使在电离层变化剧烈的情况下,仍然可以有效减小电离层延迟的影响。电离层残差组合可以表示为:

$$\Phi_{PIR} = \phi_1 - (f_1/f_2)\phi_2 = N_1 - (f_1/f_2)N_2 + I_{res} \quad (7)$$

式中: $I_{res} = (\theta_{12} - 1)I/\lambda_1$, $\Phi_{PIR}, \phi_1, \phi_2$ 单位为周。

当存在周跳时,历元间的二次差可以表示为:

$$\begin{aligned} &\Delta N_1 - (f_1/f_2)\Delta N_2 = \\ &[\Phi_{PIR}(t) - 2\Phi_{PIR}(t-1) + \Phi_{PIR}(t-2)] - \\ &[I_{res}(t) - 2I_{res}(t-1) + I_{res}(t-2)] + \varepsilon \end{aligned} \quad (8)$$

理论上,式(8)的标准差为 $\sigma_{\Delta\Phi} = 0.09$ 周,取最小盲点周跳组合 $|\Delta N_1| = |\Delta N_2| = |\Delta N_3| = 1$,组合周跳探测值约为0.28,大于 $3\sigma_{\Delta\Phi}$ 。可实现对盲点周跳的探测。由式(8)可知,若组合探测值在历元 t 和 $t+1$ 时刻检测到周跳,则在原始数据中,周跳发生在 $t+2$ 历元。

从上述可知,通过式(6)和(8),可以得到周跳发生的历元,但周跳大小仍然未知。本文采用在已知周跳发生历元处,联立两组无电离层伪距相位组合和一组电离层变化量可求得的无几何相位组合的方法,确定周跳的具体数值。

2.3 周跳值的确定

根据文献[11],三频相位、伪距组合观测值可表示为:

$$\begin{cases} \Phi_{i,j,k} = \frac{if_1\Phi_1 + jf_2\Phi_2 + kf_3\Phi_3}{f_{i,j,k}} \\ P_{i,j,k} = \frac{if_1P_1 + jf_2P_2 + kf_3P_3}{f_{i,j,k}} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $f_{i,j,k}$ 表示为三频组合观测量频率表示如下:

$$f_{i,j,k} = if_1 + jf_2 + kf_3 \quad (10)$$

组合观测量的波长、相位整周数、电离层比例因子和噪声系数分别为:

$$\lambda_{i,j,k} = \frac{c}{f_{i,j,k}} \quad (11)$$

$$N_{i,j,k} = iN_1 + jN_2 + kN_3 \quad (12)$$

$$\theta_{i,j,k} = \frac{f_1^2(i/f_1 + j/f_2 + k/f_3)}{f_{i,j,k}} \quad (13)$$

$$\mu_{i,j,k} = \frac{(if_1^2) + (jf_2^2) + (kf_3^2)}{f_{i,j,k}^2} \quad (14)$$

为了研究北斗三频组合观测量的特性,选出最优的组合系数,分别以波长、电离层比例因子、观测噪声为参考量,列出几组不同组合系数的结果,如表 1 所示。

表 1 北斗组合观测量特性

Table 1 BeiDou combination observation characteristics

(i, j, k)	$\lambda_{i,j,k}$	$\theta_{i,j,k}$	$\mu_{i,j,k}$
(0, -1, 1)	4.887 6	-1.591 5	28.528 7
(1, 4, -5)	6.375 1	0.652 1	172.613
(-1, 0, 1)	-1.025 4	-1.230 6	6.875 1
(0, 1, 1)	0.121 2	1.591 5	0.707 3
(1, 0, 1)	0.106	1.230 6	0.710 9

从表 1 可以看出,组合(0, -1, 1)和(1, 4, -5)为超宽巷组合,(-1, 0, 1)为宽巷组合,(0, 1, 1)和(1, 0, 1)为窄巷组合。以波长较长、观测误差较小,电离层延时可消除为原则,本文取超宽巷组合(0, -1, 1)和宽巷组合(-1, 0, 1)构成两组周跳探测量。

超宽巷组合可以表示为:

$$N_{0,-1,1} = N_3 - N_2 = \frac{(-f_2\Phi_2 + f_3\Phi_3 - f_2P_2 + f_3P_3)}{-f_2 + f_3} - \frac{f_2\Phi_2 + f_3\Phi_3}{f_2 + f_3} \quad (15)$$

$$\lambda_{0,-1,1}$$

将式(15)在历元间求差,当有周跳发生时,组合周跳值可表示为:

$$\Delta N_{0,-1,1} = N_3 - N_2 = \frac{(-f_2\Delta\Phi_2 + f_3\Delta\Phi_3 - f_2\Delta P_2 + f_3\Delta P_3)}{-f_2 + f_3} - \frac{f_2\Delta\Phi_2 + f_3\Delta\Phi_3}{f_2 + f_3} \quad (16)$$

由于电离层延迟项在载波相位组合和伪距组合求差的过程中被消除, $\Delta N_{0,-1,1}$ 只存在观测噪声。根据误差-协方差传播定律, $\Delta N_{0,-1,1}$ 的标准差为 0.066 周,显然小于 0.5 周,取:

$$\Delta \hat{N}_{0,-1,1} = \text{round}(\Delta N_{0,-1,1}) \quad (17)$$

式中: $\text{round}()$ 表示四舍五入后去整。将 $\Delta N_{0,-1,1}$ 看为是均值为 0, 标准差为 0.066 的高斯分布,则周跳探测直接取整成功率^[14]为:

$$P_1 = P(|\Delta N_{0,-1,1} - \Delta \hat{N}_{0,-1,1}| < 0.5) = 100\% \quad (18)$$

同理可知,宽巷组合(-1, 0, 1)可以表示为:

$$\Delta N_{-1,0,1} = \left(\frac{f_3\Delta\Phi_3 - f_1\Delta\Phi_1}{f_3 - f_1} - \frac{f_1\Delta P_1 + f_3\Delta P_3}{f_1 + f_3} \right) / \lambda_{-1,0,1} \quad (19)$$

其中, $\Delta N_{-1,0,1}$ 的标准差为 0.295, 取:

$$\Delta \hat{N}_{-1,0,1} = \text{round}(\Delta N_{-1,0,1}) \quad (20)$$

周跳探测直接取整成功率为:

$$P_1 = P(|\Delta N_{-1,0,1} - \Delta \hat{N}_{-1,0,1}| < 0.5) = 91\% \quad (21)$$

由于需要 3 组独立的线性组合联立才能求出周跳值的大小,显然要求组合系数之和不为 0, 而满足此条件时,由于变量间存在一定比例系数,通常无法同时满足波长较长和观测噪声小的条件^[4]。本文采用考虑电离层延迟变化量的无几何相位组合作为第 3 组探测量。

以电离层延迟小,观测噪声较小为原则,表 2 给出了几组较优的无几何相位组合。

表 2 较优的无几何相位组合

Table 2 The better geometry - free phase combination

(α, β, γ)	$\xi^{(a)}$	$3\Delta\sigma$
(0, -1, 1)	-0.157 9	0.002 9
(1, 0, -1)	-0.514 5	0.002 6
(1, -2, 1)	-0.830 3	0.004 9
(1, -1, 0)	-0.672 4	0.002 7

注:a) $\xi = \alpha + \theta_{12}\beta + \theta_{13}\gamma$

由表 2 可见,(0, -1, 1)和(1, 0, -1)组合已经用于构成伪距相位组合,为防止联立后导致病态方程,不再选用该组合。

无几何相位组合可表示为:

$$N_{CF} = \lambda_1\alpha N_1 + \lambda_2\beta N_2 + \lambda_3\gamma N_3 = (\alpha\Phi_1 + \beta\Phi_2 + \gamma\Phi_3) - \zeta\Delta I + \varepsilon_{\phi_{CF}} \quad (22)$$

当存在周跳时,在历元间求差可得:

$$\Delta N_{CF} = \lambda_1\alpha\Delta N_1 + \lambda_2\beta\Delta N_2 + \lambda_3\gamma\Delta N_3 = (\alpha\Delta\Phi_1 + \beta\Delta\Phi_2 + \gamma\Delta\Phi_3) - \zeta\Delta I + \varepsilon_{\phi_{CF}} \quad (23)$$

由表 2 知 ξ 不为 0, ΔI 不可忽略不计。而 ΔI 可表示为^[15]:

$$\Delta I = \Delta(\Phi_i - \Phi_i) / (\theta_{i_i} - 1) \quad i = 2, 3 \quad (24)$$

式中: $i = 2, 3$ 。在未发生周跳时,电离层延迟变化量 ΔI 随当前历元变化而更新。当有周跳发生时, ΔI 将受到周跳的影响产生明显偏差,由于实际 ΔI 在一段短时间内几乎保持不变^[6],因此,取周跳发生前的历元的 ΔI 代入式(22),近似代替周跳发生时 ΔI 的值。由表 2 可知 $\varepsilon_{\phi_{CF}}$ 很小,可以忽略。设周跳发生在历元 t ,则 ΔN_{CF} 可表示为式(25)。

$$\Delta N_{GF} = (\alpha\Delta\Phi_1(t) + \beta\Delta\Phi_2(t) + \gamma\Delta\Phi_3(t)) - \zeta(\Delta\Phi_1(t-1) - \Delta\Phi_1(t-1))/(\theta_{1i} - 1) \quad (25)$$

由表2可知,由于观测噪声极小,式(25)修复成功率为100%。

综合式(12)、(17)、(20)、(25),在已确定的周跳历元处计算下面的1组方程组(26)。

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ \lambda_1 & -\lambda_2 & 0 \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \\ \Delta N_3 \end{pmatrix}}_X = \underbrace{\begin{pmatrix} \Delta \hat{N}_{0,-1,1} \\ \Delta \hat{N}_{-1,0,1} \\ \Delta N_{gf} \end{pmatrix}}_{\Delta N} \quad (26)$$

式中: ΔN_1 、 ΔN_2 、 ΔN_3 为待求的3个载波相位上的周跳值。系数矩阵A的秩为3,系数矩阵可逆,故式(26)可确定唯一的周跳值。由于式(20)取整成功率未达到100%,待求周跳值直接取整可能存在偏差,故采用文献[11]中空间搜索和1范数最小原则进行。1范数最小原则可表示为: $\|AX - \Delta N\|_1 = \min$ 。

3 算例分析

为验证本文周跳探测和修复的效果,本文采用司南K508GNSS卡板提供的2014年7月1日上海闵行区实测数据,原始文件采样间隔为10s,将原始观测文件提取为采样间隔为30s的观测数据,实验分析使用C01卫星的3个频点数据。原始观测数据中不存在周跳。

3.1 周跳发生历元的探测

人为的在原始观测历元中加入不同类型的周跳组合。周跳组合的大小和加入的历元如表3所示。这里仅取部分周跳组合的情况为例,而对其他典型组合探测情况将仅在表4中以文字标示出。采用无几何无电离层载波相位组合的情况如图1所示,二次历元间差分的电离层残差组合探测周跳的情况如图2所示。由图1和2可见,200历元处人为加入盲点周跳组合(1,1,1),无几何无电离层载波相位组合无法探测出该周跳,而历元间二次差分的电离层残差组合曲线却在该处发生跳变,对其成功探测。在50历元处人为加入周跳组合(0,0,1),二次历元间差分的电离层残差法由于只在B1、B2频点上求解,而当仅有B3频点载波相位上发生周跳时,将无法

表3 加入周跳组合的位置和大小

历元	周跳组合	周跳类型
50	(0,0,1)	单频点小周跳
100	(1,0,1)	双频点小周跳
150	(1,-2,1)	三频点小周跳
200	(1,1,1)	盲点周跳
250	(35,10,-28)	大周跳

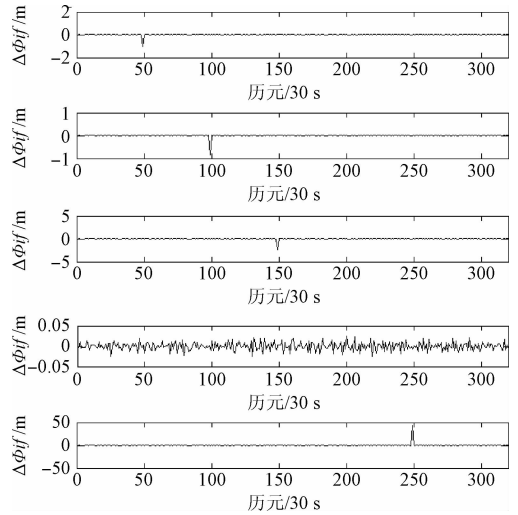


图1 无几何无电离层载波相位组合周跳探测
Fig. 1 A geometry-free and ionosphere-free combination (GIF) cycle slip detection

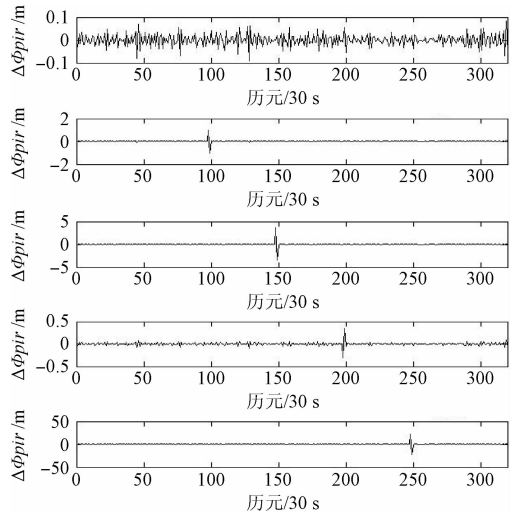


图2 二次历元间差分的电离层残差组合探测周跳
Fig. 2 The second-order time-difference phase ionospheric residual combination cycle slip detection

正确探测,而无几何无电离层组合在该处探测量超过阈值,成功探测周跳值。可见以上两个组合均可以相互探测各自的盲点周跳,且探测的非盲点周跳发生历元相同。综合以上两个组合,可以探测任意组合的周跳发生历元。

3.2 周跳值的探测与修复

进一步验证本文周跳值探测结果的准确性,本文参考文献[1]中表格形式,在表4中给出了各种周跳类型下探测的结果。从表4中可见,本文方法对各种周跳均可以准确进行探测和修复。

表4 加入各种周跳的探测和修复结果

Table 4 The result of cycle slip detection and correction

历元	周跳组合	周跳类型	解算实数解	取整解
50	(0,0,1)	单频点小周跳	(0.066,0.066,1.066)	(0,0,1)
100	(0,1,0)	单频点小周跳	(0.086,1.086,0.085)	(0,1,0)
230	(1,0,0)	单频点小周跳	(1.182,0.182,0.182)	(1,0,0)
80	(1,1,1)	盲点周跳	(1.159,1.159,1.159)	(1,1,1)
190	(-2,-2,-2)	盲点周跳	(-1.889,-1.889,-1.889)	(-2,-2,-2)
270	(1,1,0)	双频点小周跳	(1.237,1.237,0.237)	(1,1,0)
140	(-1,0,1)	双频点小周跳	(-1.089,-0.089,0.911)	(-1,0,1)
65	(0,1,-1)	双频点小周跳	(-0.078,0.922,-1.078)	(0,1,-1)
110	(1,-1,1)	三频点小周跳	(0.937,-1.062,0.937)	(1,-1,1)
256	(2,1,-1)	三频点小周跳	(2.110,1.110,-0.890)	(2,1,-1)
300	(35,10,-28)	大周跳	(35.060,10.060,27.941)	(35,10,-28)
150	(1,-2,1)		(0.980,-2.021,0.980)	(1,-2,1)
151	(2,-1,0)		(1.914,-1.086,-0.086)	(2,-1,0)
152	(0,0,-1)	连续周跳	(-0.073,-0.073,-1.073)	(0,0,-1)
153	(1,-1,0)		(1.009,-0.991,0.009)	(1,1,0)

4 结 论

本文通过构建无几何、无电离层组合,减小因采样率降低,而导致的电离层延时变化量增大对周跳探测的影响。先通过无几何无电离层载波相位组合和两次历元间差分的电离层残差组合探测周跳发生时间,这两组组合的观测误差都很小,对周跳发生情况探测灵敏,但由于这两组组合的组合系数不为整数,会使组合模糊度失去整数特性,求解过程中造成偏差,故重新选取两组无电离层伪距相位组合,和1组无几何组合,该无几何组合未将电离层延时变化量直接消弱或忽略,而是用未发生周跳处的电离层延时变化量近似代替发生周跳处的值,使得电离层延时变化量较大时仍能成功探测。本文虽选取了5组组合探测,但由于在周跳值的确定过程中仅是对周跳发生历元处进行处理,并未增加计算量。实验结果表明,在低采样率情况下,本文提出的方法可以逐个历元探测各种类型的周跳,具有很好的适用性、实时性。本文在求解过程中,忽略了多径效应造成的误差的影响,在下一步的研究中可以进一步验证多径效应对实验结果的影响并加以改进。

参考文献

- [1] 段荣,赵修斌,庞春雷,等. 一种基于TurboEdit改进的GPS周跳探测与修复方法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(11):2487-2494.
DUAN L,ZHAO X B,PANG CH L,et al Improved cycle slip detection and repair method for GPS receiver based on TurboEdit algorithm[J] Chinese Journal of Scientific Instrument,2015,36(11):2487-2494.
- [2] 滕云龙,师奕兵,郑植. 单频载波相位的周跳探测与修

复算法研究[J]. 仪器仪表学报,2010,31(8):1700-1705.

TENG Y L,SHI Y B,ZHENG ZH. Algorithm of cycle slip detection and correction in single frequency carrier phase[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2010,31(8):1700-1705.

- [3] 李显,吴美平,张开东,等. 基于粗差检验理论的单频周跳探测和修复方法[J]. 仪器仪表学报,2012,33(10):2315-2321.

LI X,WU M P,ZHANG K D, et al. Applying outlier test theory to detect and correct cycle-slip [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33 (10): 2315-2321.

- [4] 姚一飞,高井祥,王坚,等. 北斗三频载波观测值的周跳实时探测与修复[J]. 中国矿业大学学报,2014,43(6):1140-1148.

YAO Y F, GAO J X, WANG J, et al. Real-time cycle-slip detection and repair for compass triple-frequency carrier phase observations [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43 (6): 1140-1148.

- [5] 王华润,柴洪洲,谢恺. 北斗三频无几何、消电离层组合周跳探测方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,2015,35(3):406-411.

WANG H R, CHAI H ZH, XIE K. Study of cycle-slip detection using BDS triple-frequency geometry-free and ionosphere-free combination[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(3):406-411.

- [6] ZHAO Q L, SUN B Z, DAI ZH Q, et al. Real-time detection and repair of cycle slip in triple-frequency GNSS measurements[J]. GPS Solutions, 2015, 19(3):

- 381-391.
- [7] DE LACY M C, REGUZZONI M, SANSÒ F. Real-time cycle slip detection in triple-frequency GNSS [J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(3): 353-362.
- [8] DAI ZH, KNEDLIK S, LOFFELD O. Instantaneous triple-frequency GPS cycle-slip detection and repair [J]. *International Journal of Navigation and Observation*, 2009, DOI:10.1155/2009/407231.
- [9] 谢恺, 柴洪洲, 王敏. 不同采样间隔下的三频周跳探测与修复算法研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(1): 139-143.
- XIE K, CHAI H ZH, WANG M. Tri-frequency cycle-slip detection and repair with different sampling interval [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(1): 139-143.
- [10] 伍岳. 第二代导航卫星系统多频数据处理理论及应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- WU Y. The theory and application on multi-frequency data processing of GNSS 2 [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [11] FENG Y M. GNSS three carrier ambiguity resolution using ionosphere-reduced virtual signals [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(12): 847-862.
- [12] WU Y, JIN S G, WANG Z M, et al. Cycle slip detection using multi-frequency GPS carrier phase observations: A simulation study [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(2): 144-149.
- [13] CAI C S, LIU Z Z, XIA P F, et al. Cycle slip detection and repair for undifferenced GPS observations under high ionospheric activity [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 247-260.
- [14] 李金龙, 杨元喜, 徐君毅, 等. 基于伪距相位组合实时探测与修复 GNSS 三频非差观测数据周跳 [J]. *测绘学报*, 2011, 40(6): 717-722, 729.
- LI J L, YANG Y X, XU J Y, et al. Real-time cycle-slip detection and repair based on code-phase combinations for GNSS triple-frequency un-differenced observations [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(6): 717-722, 729.
- [15] 黄令勇, 宋力杰, 王琰, 等. 北斗三频无几何相位组合周跳探测与修复 [J]. *测绘学报*, 2012, 41(5): 763-768.
- HUANG Y L, SONG L J, WANG Y, et al. Beidou triple-frequency geometry-free phase combination for cycle-slip detection and correction [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 763-768.

作者简介



徐婷佳, 1990 年出生, 合肥工业大学在读硕士研究生, 主要研究方向为北斗高精度定位。

E-mail: xtj9182@163.com

Xu Tingjia was born in 1990. And now she is M. Sc. candidate in Hefei University of Technology. Her research interest mainly focuses on high precision position based on BeiDou navigation satellite system.



鲁昌华 (通讯作者), 1962 年出生, 现任合肥工业大学教授。目前主要研究方向为智能信息处理等。

E-mail: lch6208@163.com

Lu Changhua (Corresponding author) was born in 1962. And he is a professor in Hefei University of Technology now. His main research interests include intelligent information processing and so on.