

# 利用北斗三频非差数据进行周跳实时探测与修复

谢建涛<sup>1</sup> 隋春玲<sup>2</sup> 郝金明<sup>1</sup> 高 姍<sup>3</sup> 崔志伟<sup>4</sup>

1 信息工程大学导航与空天目标工程学院,河南 郑州, 450052  
2 61175 部队,山东 淄博, 255400  
3 中国国土资源航空物探遥感中心,北京, 100083  
4 61206 部队,北京, 100042

**摘 要:**结合我国北斗导航卫星系统的特点,通过对三频数据进行线性最优组合来有效探测和修复各类周跳。应用了 5 种线性几何无关组合并基于三步法进行周跳探测。对于探测到的不同周跳,通过特定的三频载波相位线性组合进行有效的分辨和修复,最后基于北斗三频实测数据,针对不同电离层延迟变化水平,分别就 1 s、15 s、30 s 不同采样间隔下的周跳探测和修复能力进行了验证,取得了较优的结果。

**关键词:**三频;北斗导航卫星系统;周跳;最优线性组合

**中图法分类号:**P228.41; P207      **文献标志码:**A

周跳探测和修复是 GNSS 数据处理的重要组成部分,周跳探测与修复算法在数据处理过程中不断完善与应用<sup>[1]</sup>。目前载波相位精密导航定位中的周跳探测方法主要有码相组合法、电离层残差法、多普勒积分法以及历元间差分法<sup>[2,3]</sup>等。北斗导航卫星系统在体制上的最大创新在于率先实现了三频数据的播发。相比双频数据,三频数据能够形成更多更优的线性组合,其等效波长更长,观测噪声和电离层影响也更小,这些优良组合为周跳探测与修复提供了更多选择和帮助。

文献[2]提出了一种实时算法,用来探测和修复三频 GNSS 数据中的周跳值,并将该算法应用于单点定位数据处理中。文献[3]提出了一种利用两个电离层无关线性组合以及 LAMBDA 算法对周跳备选值进行搜索的算法,并结合 GPS 三频实测数据进行周跳探测与修复。文献[4]通过北斗三频载波相位无几何组合探测和修复周跳,修复方法较为复杂。文献[5]将载波观测量和伪距观测量进行了组合,但探测效果受伪距噪声的影响,且这两种方法都未能充分考虑不同的历元间电离层延迟变化水平。文献[6-11]分别就多频条件下周跳探测与修复、模糊度解算等问题进行了研究。

本文充分考虑了历元间电离层延迟变化的影响,基于北斗三频非差数据提出了一种实时探测、

修复周跳的算法,探测过程中应用了 5 种线性几何无关组合,基于三步法进行周跳探测。

## 1 北斗基本观测量及观测方程

北斗导航卫星可同时播发 3 个频率的导航信号,分别是 B1(1 561. 098 MHz)、B2(1 207. 14 MHz)、B3(1 268. 520 MHz)。在历元  $t$  时刻,北斗非差载波和伪距观测方程的数学模型如下:

$$\begin{cases} P_i(t) = D(t) + k_{1i}I(t) + \varepsilon_p(t) \\ L_i(t) = D(t) - k_{1i}I(t) + B_i + \varepsilon_L(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $i=1,2,3$ ,代表三个频率; $P_i$  和  $L_i$  为对应频率  $f_i$  的伪距观测值和载波相位观测量; $\varepsilon_p$  和  $\varepsilon_L$  对应伪距观测量和载波观测量的观测噪声,包括多径效应的影响; $D$  代表非弥散延迟,可理解为信号在钟差和对流层延迟条件下的传播距离; $I$  为对应  $f_1$  频点的电离层延迟,通过计算系数  $k_{1i} = (f_1/f_i)^2$  得到; $B_i$  为非零初始相位和整周载波相位模糊度  $N_i$  的和, $f_i$  频点上的初始载波相位模糊度通常为非整数。

周跳探测和修复可以看成是探求含有噪声的规则采样下平滑信号时间序列的非连续性。本文中处理的时间序列是载波观测值  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和伪距观测值  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  的线性组合。对于北斗导航卫星系统,本文中载波观测值的观测噪声为理想

的  $\sigma_{L_1}=\sigma_{L_2}=\sigma_{L_3}=0.002\text{ m}$ ,而伪距观测值的观测噪声  $\sigma_{P_1}=\sigma_{P_2}=0.2\text{ m}^{[5]},\sigma_{P_3}=0.04\text{ m}^{[7]}$ ,整周周跳值表示为  $\delta N_1,\delta N_2,\delta N_3$ 。

## 2 周跳探测

本文的周跳探测部分基于载波和伪距观测值分以下三步构造了 5 种线性组合:① 伪距和载波观测量进行线性组合探测“大周跳”,即远大于观测噪声的周跳值;② 载波线性组合探测“小周跳”;③ 构造基于载波观测量的线性组合对前两步未探测到的周跳组合进行探测。

### 2.1 大周跳

步骤①中,载波和伪距观测量线性组合的约束条件为组合噪声最小及几何无关。其方程为:

$$Y_i(t)=a_{ii}L_i(t)+b_{i1}P_1(t)+b_{i2}P_2(t)+b_{i3}P_3(t)$$

(2)

式中,  $i=1,2,3;a_{ii}=1;b_{i1}=b_{i2}=-1/27;b_{i3}=-25/27$ 。组合系数可以通过约束条件(3)得:

$$\begin{cases} a_{ii}=1 \\ a_{ii}+b_{i1}+b_{i2}+b_{i3}=0 \\ \min_{b_{i1},b_{i2},b_{i3}}[a_{ii}^2\sigma_{L_i}^2+b_{i1}^2\sigma_{P_1}^2+b_{i2}^2\sigma_{P_2}^2+b_{i3}^2\sigma_{P_3}^2] \end{cases}$$

(3)

依据误差传播定律,观测量  $Y_i$  的标准差  $\sigma_{Y_i}$  为 7 cm 量级,为了避免将未模型化的误差放大,设系数  $a_{ii}=1$ 。将式(1)代入式(2)可知,  $Y_i$  可表示为初始模糊度参数、电离层延迟项以及观测噪声三者之和。其中,电离层延迟项可以表示为:

$$M_i=-K_{1i}a_{ii}+b_{i1}+K_{12}b_{i2}+K_{13}b_{i3}$$

(4)

式中,  $i=1,2,3;M_i$  分别取  $-2.50,-3.17,-3.02;K_{1i}=f_i^2/f_i^2;K_{11}=1,K_{12}=1.672\ 4,K_{13}=1.514\ 5$ 。式(2)中线性组合的优点在于三个载波上的周跳不会叠加和混淆,因此,一个载波上的周跳不会受到另一载波上的周跳补偿和干扰。将相邻两个历元的观测量  $Y_i$  组差得到  $\Delta Y_i$ 。需要注意的是,  $\Delta Y_i$  可看作是均值为  $\delta N_i\lambda_i$  的随机变量,其方差取决于组合观测量噪声标准差  $\sigma_{Y_i}$  和历元间电离层延迟变化量的方差。

本文对两组北斗三频数据进行了分析,数据采集地点为郑州,采集时间为 2012 年 12 月 28 日,观测时长分别为 3 h 和 2 h,其电离层延迟变化统计信息见表 1。

从表 1 可以看出,即使对于 30 s 采样间隔,电离层延迟变化的标准差仍小于 1 cm,因此,假定观测噪声与时间无关,且电离层变化量  $\Delta I$  是与观测噪声无关的随机量,其均值为零,标准差

$\sigma_{\Delta I}=1\text{ cm}$ ,则  $\Delta Y_i$  的方差可为:

表 1 电离层延迟变化统计

Tab. 1 Statistics of Ionospheric Delay Variation

采样间 隔/s	数据集 1/m		数据集 2/m	
	标准差	最大值	标准差	最大值
1	0.003	0.015	0.003	0.017
15	0.005	0.027	0.006	0.030
30	0.006	0.037	0.007	0.041

$$\sigma_{\Delta Y_i}^2=2\sigma_{Y_i}^2+M_i^2\sigma_{\Delta I}^2$$

(5)

根据式(5)计算得到  $\sigma_{\Delta Y_i}\approx 6\text{ cm},i=1,2,3$ 。周跳探测的门限值设定为  $4\sigma_{\Delta Y_i}$ 。假定  $\Delta Y_i$  服从正态分布,均值为  $\delta N_i\lambda_i$ ,假设  $H_0:\delta N_i=0$  被拒绝,即探测到周跳存在:

$$\Delta Y_i(t)=|Y_i(t)-Y_i(t-1)|>4\sigma_{\Delta Y_i}\approx 24\text{ cm}$$

(6)

对应置信水平  $\alpha=P(|Z|>4)=0.006\%$ ,可得周跳探测“误警”的可能性非常小。当  $H_0$  被接受时,并不表示不存在周跳。当存在周跳  $\delta N_i$  而探测不到的概率即“漏探”的可能性为:

$$\beta=P(Z>\frac{\delta N_i\lambda_i-4\sigma_{\Delta Y_i}}{\sigma_{\Delta Y_i}})$$

(7)

组合观测量  $Y_1,Y_2,Y_3$  上存在的周跳  $\delta N_1,\delta N_2,\delta N_3$  的取值范围设为  $1\sim 10$ ,并假定漏探的概率  $\beta<0.01\%$ ,得到三个频点上不能有效探测到的周跳值为  $|\delta N_i|=1,2(i=1,2,3)$ ,我们将这几种周跳称为“小周跳”,探测方法在 § 2.2 中阐述。

### 2.2 小周跳

为了能探测到“小周跳”,需进一步降低组合观测量噪声。这里仅采用载波观测量构造几何无关和电离层无关组合,其数学模型如下:

$$Y_4(t)=a_{41}L_1(t)+a_{42}L_2(t)+a_{43}L_3(t)$$

(8)

式中,  $a_{41}=-2.348;a_{42}=-7.652;a_{43}=10$ 。组合系数可以通过以下约束条件得到:

$$\begin{cases} a_{43}=10 \\ a_{41}+a_{42}+a_{43}=0 \\ a_{41}+K_{12}a_{42}+K_{13}a_{43}=0 \end{cases}$$

(9)

由于组合观测量  $Y_4$  是电离层无关的,因此,假定其观测噪声是时间无关的,则  $\Delta Y_4$  的方差  $\sigma_{\Delta Y_4}^2=2\sigma_{Y_4}^2$ 。假定  $\Delta Y_4$  服从正态分布,假设:  $H_0:\delta N_1=\delta N_2=\delta N_3=0$  被拒绝,即探测到周跳存在:  $\Delta Y_4(t)=|Y_4(t)-Y_4(t-1)|>4\sigma_{\Delta Y_4}\approx 14.4\text{ cm}$ ,置信水平为  $\alpha=0.006\%$ 。

对所有的小周跳组合进行探测,可得到不能被探测的周跳组合有  $(1,1,1),(-1,-1,-1),(2,2,2)$  以及  $(-2,-2,-2)$ ,对于这 4 种特定的

周跳组合,其探测方法将在 § 2.3 中阐述。需要说明的是,这里只是对小周跳进行探测,至于周跳存在于哪一个频点以及如何修复,需要通过构造新的观测量进行分辨和修复。对于大周跳和特定的周跳组合的情况也是如此。

### 2.3 特定周跳组合

为了能够探测到上述的几种特定的周跳组合,构造如下观测量:

$$Y_5(t) = a_{51}L_1(t) + a_{52}L_2(t) + a_{53}L_3(t)$$

(10)

式中, $a_{51}=1;a_{52}=-0.62;a_{53}=-0.38$ 。组合系数可以通过以下约束条件得到:

$$\begin{cases} a_{51} = 1 \\ a_{51} + a_{52} + a_{53} = 0 \\ \max_{a_{52}, a_{53}} \left[ \frac{(a_{51}\lambda_1 + a_{52}\lambda_2 + a_{53}\lambda_3)^2}{\sigma_{\Delta Y_5}^2} \right] \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\sigma_{\Delta Y_5}^2 = 2\sigma_{Y_5}^2 + M_5^2\sigma_{\Delta I}^2$ ;  $\sigma_{Y_5}^2 = a_{51}^2\sigma_{L_1}^2 + a_{52}^2\sigma_{L_2}^2 + a_{53}^2\sigma_{L_3}^2$ ;  $M_5 = a_{51} + K_{12}a_{52} + K_{13}a_{53}$ ; 观测量的噪声水平为 2.5 mm。因此,即使对于周跳组合(1,1,1)产生的 8 cm 水平的跳变,当相邻历元间电离层延迟变化小于 7 cm 时,上述的所有特定周跳组合都能探测到;而在稳定的电离层环境下,7 cm 水平的电离层延迟变化是很罕见的。为更加精确,假定  $\sigma_{\Delta Y_5} \approx 7$  mm,且  $\Delta Y_5$  服从正态分布,假设  $H_0:\delta N=0$  被拒绝,即周跳被探测到:

$$\begin{aligned} \Delta Y_5(t) &= |Y_5(t) - Y_5(t-1)| > \\ 4\sigma_{\Delta Y_5} &\approx 2.8 \text{ cm} \end{aligned} \quad (12)$$

对应的置信水平为  $\alpha=0.006\%$ 。

## 3 周跳修复

一旦探测到某一历元存在周跳,就要确定周跳的大小,即每个载波上整周周跳的数值大小。本文通过载波相位线性组合确定周跳大小。周跳概略值计算如下:

$$\delta\tilde{N}_i = \text{round}\left(\frac{\Delta Y_i}{\lambda_i}\right), i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

通过比较载波波长与  $\Delta Y_i$  的噪声水平可知,周跳值  $\delta N_i = \delta\tilde{N}_i + \delta n_i$ ,且  $\delta n_i = -1, 0, 1$ 。为确定周跳大小,这里考虑组合观测量  $Y_5(t)$ ,将其在相邻历元间作差得到:

$$\Delta Y_5(t) = Y_5(t) - Y_5(t-1) \quad (14)$$

建立目标函数:

$$\begin{aligned} \varphi_5(t) &= |\Delta Y_5(t) - (a_{51}\delta\tilde{N}_1\lambda_1 + a_{52}\delta\tilde{N}_2\lambda_2 + \\ &a_{53}\delta\tilde{N}_3\lambda_3) - (a_{51}\delta n_1\lambda_1 + a_{52}\delta n_2\lambda_2 + a_{53}\delta n_3\lambda_3)| \end{aligned} \quad (15)$$

计算得到使得目标函数最小的周跳组合。为了增加目标函数的稳健性,构造如下的约束条件:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} | (a_{51}\delta n_1\lambda_1 + a_{52}\delta n_2\lambda_2 + a_{53}\delta n_3\lambda_3) - \\ (a_{51}\delta m_1\lambda_1 + a_{52}\delta m_2\lambda_2 + a_{53}\delta m_3\lambda_3) | > 4\sigma_{\Delta Y_5} \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $\delta n_1, \delta m_1 = -1, 0, 1$  且  $(\delta n_1, \delta n_2, \delta n_3) \neq (\delta m_1, \delta m_2, \delta m_3)$ 。将所有的组合代入式(16)进行验证,不能满足式(16)的组合见表 2。

表 2 不能满足式(16)的组合

Tab. 2 Combinations not Meet Formula(16) Requirement

$\delta n_1$	$\delta n_2$	$\delta n_3$	$\delta m_1$	$\delta m_2$	$\delta m_3$
-1	-1	-1	1	1	0
-1	-1	0	0	1	-1
-1	-1	0	1	1	1
-1	-1	1	0	1	0
0	-1	0	1	1	-1
0	-1	1	1	1	0
0	1	-1	-1	-1	0
0	1	0	-1	-1	1
1	1	-1	0	-1	0
1	1	0	-1	-1	-1
1	1	0	0	-1	1
1	1	1	-1	-1	0

表 2 中所有的组合情况,按照  $(\delta n_1 - \delta m_1, \delta n_2 - \delta m_2, \delta n_3 - \delta m_3)$  进行分类可以得到(1,2,-1)、(2,1,1)、(-1,2,1)、(2,2,1)4 种情况,其中  $(\delta n_1 - \delta m_1, \delta n_2 - \delta m_2, \delta n_3 - \delta m_3)$  与  $(\delta m_1 - \delta n_1, \delta m_2 - \delta n_2, \delta m_3 - \delta n_3)$  算作同一类。以(1,2,-1)为例得到  $d_6(t) = |a_{61}\lambda_1 + 2a_{62}\lambda_2 - a_{63}\lambda_3|$ ,构造组合观测量:

$$Y_6(t) = a_{61}L_1(t) + a_{62}L_2(t) + a_{63}L_3(t)$$

(17)

式中, $a_{61}=1;a_{62}=-0.584;a_{63}=-0.416$ 。组合系数通过以下约束条件得到:

$$\begin{cases} a_{61} = 1 \\ a_{61} + a_{62} + a_{63} = 0 \\ \max_{a_{62}, a_{63}} \left[ \frac{d_6^2}{\sigma_{\Delta Y_6}^2} \right] \end{cases} \quad (18)$$

式中,

$$\begin{cases} \sigma_{\Delta Y_6}^2 = 2\sigma_{Y_6}^2 + M_6^2\sigma_{\Delta I}^2 \\ \sigma_{Y_6}^2 = a_{61}^2\sigma_{L_1}^2 + a_{62}^2\sigma_{L_2}^2 + a_{63}^2\sigma_{L_3}^2 \\ M_6 = a_{61} + k_{12}a_{62} + k_{13}a_{63} \end{cases} \quad (19)$$

组合观测量  $Y_6$  几何无关且将两组周跳组合之间的差异与观测噪声的比值最大化。目标函数为:

$$\begin{aligned} \varphi_6(t) &= |\Delta Y_6(t) - (a_{61}\delta\tilde{N}_1\lambda_1 + a_{62}\delta\tilde{N}_2\lambda_2 + \\ &a_{63}\delta\tilde{N}_3\lambda_3) - (a_{61}\delta n_1\lambda_1 + a_{62}\delta n_2\lambda_2 + a_{63}\delta n_3\lambda_3)| \end{aligned} \quad (20)$$

类似地,对于 $(2,1,1)$ 、 $(-1,2,1)$ 、 $(2,2,1)$ ,  
可以用相同的方法分别构造观测量 $Y_7$ 、 $Y_8$ 、 $Y_9$ :

$$\begin{cases} Y_7(t) = a_{71}L_1(t) + a_{72}L_2(t) + a_{73}L_3(t) \\ Y_8(t) = a_{81}L_1(t) + a_{82}L_2(t) + a_{83}L_3(t) \\ Y_9(t) = a_{91}L_1(t) + a_{92}L_2(t) + a_{93}L_3(t) \end{cases}$$

(21)

式中,

$$\begin{cases} a_{71} = 1, a_{72} = 0.193, a_{73} = -1.193 \\ a_{81} = 1, a_{82} = -1.394\ 8, a_{83} = 0.394\ 8 \\ a_{91} = 1, a_{92} = 4.006\ 5, a_{93} = -5.006\ 5 \end{cases}$$

(22)

#### 4 试验分析

为验证本文方法的可行性,采用 § 2 中提及的北斗三频实测数据进行分析,在无周跳存在的历元人为加入设定的周跳组合,然后按照本文的方法进行周跳探测和修复。试验进行前,已通过数据分析测得电离层环境较为稳定,因此电离层延迟变化水平仅与数据采样间隔有关,将采样间隔分别设定为 1 s、15 s、30 s,试验结果列于表 3。

表 3 北斗三频实测数据  
Tab. 3 Beidou Data with Sampling Intervals:1 s, 15 s, 30 s

采样间隔/s	设定历元	设定周跳	估计历元	估计周跳	周跳类型	历元间差值
1	2	(1,1,1)	2	(1,1,1)	特定	$\Delta Y_5 = -0.051$
	152	(2,2,2)	152	(2,2,2)	特定	$\Delta Y_5 = -0.102$
	332	(1,0,1)	332	(1,0,1)	小	$\Delta Y_4 = 1.923$
	332	(0,0,1)	332	(0,0,1)	小	$\Delta Y_4 = 2.374$
	332	(3,3,2)	332	(3,3,2)	大	$\Delta Y_1 = 0.520, \Delta Y_2 = 0.691, \Delta Y_3 = 0.419$
	332	(1,2,1)	332	(1,2,1)	小	$\Delta Y_4 = -1.878$
	332	(-2,-1,-1)	332	(-2,-1,-1)	小	$\Delta Y_4 = 0.449$
	500	(5,4,3)	500	(5,4,3)	大	$\Delta Y_1 = 0.904, \Delta Y_2 = 0.939, \Delta Y_3 = 0.655$
15	570	(1,1,1)	570	(1,1,1)	特定	$\Delta Y_5 = -0.056$
	570	(2,2,2)	570	(2,2,2)	特定	$\Delta Y_5 = -0.108$
	570	(1,0,1)	570	(1,0,1)	小	$\Delta Y_4 = 1.954$
	570	(0,0,1)	570	(0,0,1)	小	$\Delta Y_4 = 2.405$
	570	(3,3,2)	570	(3,3,2)	大	$\Delta Y_1 = 0.550, \Delta Y_2 = 0.722, \Delta Y_3 = 0.453$
	570	(1,2,1)	570	(1,2,1)	小	$\Delta Y_4 = -1.847$
	570	(-2,-1,-1)	570	(-2,-1,-1)	小	$\Delta Y_4 = 0.481$
	570	(5,4,3)	570	(5,4,3)	大	$\Delta Y_1 = 0.934, \Delta Y_2 = 0.970, \Delta Y_3 = 0.689$
30	580	(1,1,1)	580	(1,1,1)	特定	$\Delta Y_5 = -0.059$
	580	(2,2,2)	580	(2,2,2)	特定	$\Delta Y_5 = -0.111$
	580	(1,0,1)	580	(1,0,1)	小	$\Delta Y_4 = 1.905$
	580	(0,0,1)	580	(0,0,1)	小	$\Delta Y_4 = 2.356$
	580	(3,3,2)	580	(3,3,2)	大	$\Delta Y_1 = 0.467, \Delta Y_2 = 0.645, \Delta Y_3 = 0.369$
	580	(1,2,1)	580	(1,2,1)	小	$\Delta Y_4 = -1.896$
	580	(-2,-1,1)	580	(-2,-1,-1)	小	$\Delta Y_4 = 0.431$
	580	(5,4,3)	580	(5,4,3)	大	$\Delta Y_1 = 0.851, \Delta Y_2 = 0.892, \Delta Y_3 = 0.606$

#### 5 结 语

本文方法在充分考虑电离层延迟变化水平的前提下,假设载波观测值的观测噪声为理想的 $\sigma_{L_1} = \sigma_{L_2} = \sigma_{L_3} = 0.002\text{ m}$ ,而伪距观测值的观测噪声为 $\sigma_{P_1} = \sigma_{P_2} = 0.2\text{ m}, \sigma_{P_3} = 0.04\text{ m}$ ,对北斗三频数据进行了最优线性组合,针对不同类型的周跳,得到相应的最优组合。

在实测数据无周跳历元的情况下,人为加入设定的周跳值,并进行实验分析,结果表明该方法能够探测到设定的各种类型的周跳,可有效应用于北斗三频非差数据周跳实时探测和修复。此

外,针对“误探”、“漏探”的情况,在理论上进行了假设、检验,且实验中并没有出现“误探”、“漏探”。需要指出的是,本文结论是基于实验数据电离层环境稳定的情况得出的,对于活跃的电离层环境,还有待进一步研究改进。

#### 参 考 文 献

[1] Shen Junfei, He Haibo, Guo Hairong, et al. Application Research of Linear Combination Based on Triple-Frequency Observation [J]. *GNSS World of China*, 2012, 37(6): 37-40(申俊飞, 何海波, 郭海荣, 等. 三频观测线性组合在北斗导航中的应用 [J]. 全球定位系统, 2012, 37(6): 37-40)

[2] Zhen D, Stefan K, Otmar L. Realtime Cycle Slip

Detection and Determination for Multiple Frequency GNSS[C]. The 5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, New York, USA, 2008

[3] Dai Z, Knedlik S, Loffeld O. Instantaneous Triple-frequency GPS Cycle-slip Detection and Repair[J]. *Int J Navig Obs*, 2009, 82(9):555-564

[4] Ke Fuyang, Wang Qing, Pan Shuguo. GPS/GLO-NASS Cycle Slip Detection and Repair Method[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2013, 30(20):114-118(柯福阳, 王庆, 潘树国. GPS/GLONASS 周跳探测[J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(20):114-118)

[5] Huang Lingyong, Song Lijie, Wang Yan, 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(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)

[6] Cheng Pengfei, Li Wei, Bei Jinzhong, et al. Precision Analysis of BeiDou Range Measurement Signals [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5):690-695(程鹏飞, 李玮, 秘金钟. 北斗导航卫星系统测距信号的精度分析[J]. 测绘学报, 2012, 41(5):690-695)

[7] Tang Weiming, Deng Chenlong, Shi Chuang, et al. Triple-frequency Carrier Ambiguity Resolution for Beidou Navigation Satellite System[J]. *GPS Solution*, 2013, 10:112-120

[8] Feng Yanming. GNSS Three Carrier Ambiguity Resolution Using Ionosphere-reduced Virtual Signals[J]. *J Geod*, 2008, 82:847-862

[9] Li Bofeng, Feng Yanming, Shen Yunzhong. Three Carrier Ambiguity Resolution: Distance-independent Performance Demonstrated Using Semi-generated Triple Frequency GPS Signals[J]. *GPS Solution*, 2010, 14:177-184

[10] De Lacy M C, Mirko R, Fernando S. Real-time Cycle Slip Detection in Triple-frequency GNSS [J]. *GPS Solution*, 2012, 16:353-362

[11] Banville S, Langley R B. Mitigating the Impact of Ionospheric Cycle Slips in GNSS Observations[J]. *J Geod*, 2013, 87:179-193

Real-time Cycle Slip Detection in Triple-frequency BDS

XIE Jiantao<sup>1</sup> SUI Chunling<sup>2</sup> HAO Jinming<sup>1</sup> GAO Shan<sup>3</sup> CUI Zhiwei<sup>4</sup>

1 Institute of Navigation and Space Target Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China  
2 61175 Troops, Zibo 255400, China  
3 China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China  
4 61206 Troops, Beijing 100042, China

**Abstract:** In this paper, we got the optimal linear combinations which can effectively detect and repair all types of cycle slips considering the characteristics of BeiDou Navigation Satellite System(BDS). In the detection process, five geometry-free linear combinations were applied based on a three-step cycle slip detection process. For different sorts of cycle slips, specific frequency carrier phase linear combinations are used for repairs. Finally, based on Beidou triple-frequency data with different levels of ionospheric delay variation under different sampling intervals of 1 s, 15 s, 30 s respectively ,the ability of cycle slip detection and repairs were verified. The results were optimum.

**Key words:** triple-frequency; Beidou navigation satellite system; cycle slip; optimal linear combinations