

DOI:10.13203/j.whugis20200424



文章编号:1671-8860(2022)11-1860-10

多普勒积分辅助的动态单频周跳探测

杨凯淳¹ 吕志平^{1,2} 李林阳^{1,3} 邝英才¹ 许 炜¹

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 哈尔滨工业大学(深圳)空间科学与应用技术研究院,广东 深圳,518055

3 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

摘要:相位伪距组合法常应用于动态单频周跳探测,但其探测周跳的效果受伪距噪声的影响较大。因此有必要结合其他的观测值,以降低伪距噪声的影响,从而提高单频周跳探测能力。提出了一种多普勒积分辅助的动态单频周跳探测方法,先采用多普勒观测值平滑伪距观测值,降低伪距的噪声,再进行历元间差分,显著提高了动态单频周跳探测的能力。实验分别采用不同采样率、高度角变化、连续周跳和含粗差的实时动态实测数据,分别在不同历元加入1周、3周、10周的模拟周跳,在相邻历元分别加入3周、4周和5周的连续周跳。结果表明,相较于相位伪距组合法与基于多项式拟合法的相位伪距组合法,该方法可以实时探测出所有的模拟周跳。多普勒积分辅助的动态单频周跳探测方法能够显著提升单频观测值的周跳探测能力。

关键词:动态单频周跳探测;多普勒积分;相位伪距组合;历元间差分;连续周跳

中图分类号:P228 **文献标志码:**A

因单频接收机具有成本低、工作效率高等优势,利用单频数据实现精密单点定位(precise point positioning, PPP)已逐渐成为位置信息获取的重要手段之一,有必要对单频数据处理做更深入的研究^[1-3]。单频观测值不能构成有效的组合观测值,因此在对单频观测值进行周跳探测预处理时,只能采用传统的单频周跳探测方法,无法满足当前定位精度的要求。为了提高单频PPP定位精度,需要对目前的单频周跳探测方法进行改进^[4]。

国内外学者对单频周跳探测进行了大量的研究^[5-15]。文献[9]通过多项式拟合多普勒观测值进行单频周跳探测,该算法较为复杂,且受多项式拟合参数影响;文献[10]使用多项式同时拟合星间单差数据与非差数据,以探测单频周跳,该方法受采样间隔的影响较大;文献[11]提出了多项式拟合相位伪距组合观测值的方法探测单频周跳,在很大程度上改善了相位伪距组合法只能探测大周跳的缺点,但卫星高度角会对观测值产生重大影响;文献[12]提出了一种将广义延拓插值和多项式拟合相结合的单频周跳探测新方

法,虽然提高了探测精度,但需要有一定数量的无周跳连续观测历元作为前提条件。上述方法将传统方法相结合,提高了单频周跳探测率和探测精度。为了更好地改进单频周跳探测方法,首先应该克服传统方法的局限性,然后再考虑如何提高周跳探测的准确性。传统的单频周跳探测方法有多项式拟合法^[13]、相位伪距组合法^[14]以及多普勒积分法^[15]等。多项式拟合法与相位伪距组合法都不易受采样率影响,两者最大的区别是:多项式拟合法虽然探测精度高,但不利于动态周跳探测^[16-18];而相位伪距组合法尽管能用于动态周跳探测,但只有在卫星高度角较大时才能探测出较小周跳。与前两种方法相比,多普勒积分法易受低采样率数据的影响^[19-21],但受卫星高度角变化的影响较小。基于以上分析,本文提出了一种多普勒积分辅助的相位伪距组合法,可实现对单频数据的实时动态周跳探测。其主要思路是利用多普勒观测值对伪距观测值进行平滑,通过调整相位伪距组合观测值与多普勒观测值的权,克服采样率对多普勒积分法的影响,以及卫星高度角对相位伪距组合法的影响。

收稿日期:2020-08-17

项目资助:深圳市科技计划基金(KQTD20180410161218820);大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED2020-3-3-E)。

第一作者:杨凯淳,硕士生,主要研究方向为GNSS数据处理。413729378@qq.com

通讯作者:吕志平,博士,教授。ssscenter@126.com

1 单频周跳探测方法

1.1 相位伪距组合法

非差单频精密定位的观测方程为:

$$P = \rho_r^s + c \cdot (dt_r - dt^s) + d_{\text{trop}} + I_P + d_{\text{rel}} + d_{\text{mul}}^P + \varepsilon_P \quad (1)$$

$$\Phi = \rho_r^s + c \cdot (dt_r - dt^s) + d_{\text{trop}} + I_\Phi + d_{\text{rel}} + d_{\text{mul}}^\Phi + \lambda \cdot N + \varepsilon_\Phi \quad (2)$$

式中, P 为伪距观测值; Φ 为载波相位观测值; ρ_r^s 为卫星 s 到接收机 r 的几何距离; c 为光速; dt_r 为接收机钟差; dt^s 为卫星钟差; d_{trop} 为对流层延迟; I_P 与 I_Φ 分别为载波相位与伪距观测值的电离层延迟; d_{rel} 为相对论效应影响; d_{mul}^P 与 d_{mul}^Φ 分别为载波与伪距观测值的多路径效应; λ 为载波 L_1 的波长; N 为载波 L_1 的整周模糊度; ε_P 为伪距噪声; ε_Φ 为载波相位噪声。

式(2)减式(1)得:

$$\Phi - P = \lambda \cdot N + (I_\Phi - I_P) + (\varepsilon_\Phi - \varepsilon_P) + (d_{\text{mul}}^\Phi - d_{\text{mul}}^P) \quad (3)$$

式(3)中包括了电离层延迟、整周模糊度、多路径残差和接收机噪声。其中最主要的误差是电离层延迟^[22]。

忽略式(3)中的多路径效应,整周模糊度可表示为:

$$N = \frac{(\Phi - P) - (I_\Phi - I_P) - (\varepsilon_\Phi - \varepsilon_P)}{\lambda} \quad (4)$$

对式(4)进行历元间差分,当采样率较高时,电离层变化速度较慢,可以忽略。此时,整周模糊度的差分可表示为:

$$\Delta N = N_{i+1} - N_i = \frac{(\Phi_{i+1} - \Phi_i) - (P_{i+1} - P_i) + \Delta \varepsilon}{\lambda} \quad (5)$$

从理论上讲,式(5)等于0。由于存在 $\Delta \varepsilon$,所以 ΔN 一定不等于0,而应在一定范围内波动。如果在实际情况中发生周跳,则式(5)会超出规定范围。因此可根据 ΔN 是否大于阈值来判断是否发生周跳。

1.2 多项式拟合法辅助相位伪距组合法

文献[11]提出了一种多项式拟合法辅助相位伪距组合法,提高了相位伪距组合法的周跳探测能力。该方法首先使用最小二乘法求得式中各多项式的系数,并根据拟合后的残差计算出中误差,然后利用多项式拟合法^[23]拟合推估下一历元无周跳相位伪距组合观测值,将其与实际相位伪距组合观测值作差,并取其绝对值。若绝对值

小于3倍中误差,则认为本历元的观测值中没有周跳,之后去掉本次拟合中的首历元相位伪距组合观测值,增加下一历元的相位伪距组合观测值,并继续进行多项式拟合;若绝对值大于3倍中误差,则认为本历元观测值中存在周跳。确定周跳大小的计算公式为:

$$\Delta F = \frac{\Delta N_{\text{pre}} - \Delta N_{\text{cur}}}{\lambda} \quad (6)$$

式中, ΔN_{pre} 为多项式拟合的无周跳相位伪距组合法观测值; ΔN_{cur} 为有周跳的相位伪距组合法观测值; ΔF 为周跳大小。

在进行多项式拟合法计算时,拟合窗口宽度和多项式阶数是需要考虑的问题。使用本文数据进行测试发现,单独使用多项式拟合方法拟合,拟合窗口数为7个时周跳探测效果最好;而使用多项式拟合相位伪距组合观测值,拟合窗口数为8个探测结果最佳。其原因在于相位伪距组合观测值本身受伪距噪声的影响较大,而且多项式拟合本身存在拟合误差,需要更多的拟合窗口进行外推,以获得更精确的结果,由此可以看出多项式拟合法的客观性较强。

2 多普勒积分辅助的单频周跳探测方法

当使用相位伪距组合法进行周跳探测时,伪距噪声对探测结果有较大影响。使用多项式拟合法辅助相位伪距组合法进行周跳探测,虽然可以在很大程度上提高周跳探测的精度,但是由于伪距噪声和拟合误差等因素,会导致探测结果的准确性不高。针对这一问题,本文提出了一种多普勒积分辅助的单频周跳探测方法,该方法将多普勒积分法与相位伪距组合法相结合,以提高相位伪距组合法探测的准确性。

多普勒观测值与载波相位观测值的关系为^[24]:

$$D = \frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

式中, D 表示瞬时载波相位的变化率; t 为观测时刻。

$$\Phi_{i+1} = \Phi_i + \int_i^{i+1} D dt \quad (8)$$

式中, Φ_i 为历元 i 的载波相位观测值; t 为观测时刻。

将由多普勒观测值计算的历元间距离变化量记为 Δd_{i+1} ,若在历元 i 至 $i+1$ 间未发生周跳,

则将 Φ_{i+1} 与 Φ_i 作差后,再与 Δd_{i+1} 作差,该差值仅包含观测噪声的影响,且应在一定范围之内。

$$(\Phi_{i+1} - \Phi_i) - \Delta d_{i+1} < \xi \quad (9)$$

式中, ξ 为周跳探测的阈值。若发生 n 周的周跳,则该周跳大小为:

$$n = \text{int} \left[\frac{(\Phi_{i+1} - \Phi_i) - \Delta d_{i+1}}{\lambda} \right] \quad (10)$$

式中, $\text{int}[\]$ 为取整函数。

根据式(4),伪距噪声、电离层延迟和多路径残差等因素对相位伪距组合法影响很大,但通常电离层延迟变化较慢,且多路径效应对载波相位观测值的影响较小,可以忽略,所以相位伪距组合法主要受伪距噪声的影响。研究发现,多普勒观测值是载波相位的一阶导数,反映的是载波相位的变化率,它是一种非常稳定并且独立于载波相位的观测值,不会随相位发生周跳而发生变化,采用多普勒积分法探测周跳就是基于多普勒观测值不受周跳的影响提出的。因此,多普勒观测值可以平滑伪距,而不受周跳的影响^[25-27]。本文提出先利用多普勒观测值平滑伪距,减小伪距噪声对周跳探测的影响,然后结合载波相位观测值进行周跳探测,以提高相位伪距组合法探测周

$$\Delta N = \frac{(\Phi_{i+1} - \Phi_i) - [\omega_{i+1} P_{i+1} + (1 - \omega_{i+1})(P_i + \Delta d_{i+1}) - P_i] + \Delta \epsilon}{\lambda} \quad (14)$$

观察式(14)可以发现,当 ω_{i+1} 设定为常数0时,那么此时的周跳探测公式就是与式(10)对应的多普勒积分法;当 ω_{i+1} 设定为常数1时,即为与式(5)对应的相位伪距组合法。因此,该方法相当于利用平滑时间常数调整多普勒观测值和相位伪距组合观测值之间的权。根据两种传统方法的不同特点和实际情况赋予不同的权重,有利于在不同环境下进行周跳探测。

在此基础上,由于多普勒积分辅助相位伪距组合法将3种观测值结合到一起用于周跳探测,所以需要采用新的阈值设置方法。传统的多普勒积分法阈值 $m_{\Delta N_1}$ ^[12] 为:

$$m_{\Delta N_1} = \pm \sqrt{2m_\phi^2 + 2(1 + \omega^2 - \omega)^2 m_P^2 + (1 - \omega)^2 \left(\frac{\Delta t}{2}\right)^2 2m_D^2} \quad (17)$$

式中, ω 为平滑时间常数。

该方法在应用多普勒观测值时,还充分利用了多普勒积分值的特性。当某一历元上发生周跳时,由于噪声对多普勒积分值的影响较小,可先将前一历元的无周跳载波相位观测值与多普勒积分值相结合,推估出该历元的无周跳载波数据,再与下一历元的载波相位观测值重新进行组

跳的能力。

对多普勒平滑后的相位伪距组合法进行推导。因为伪距观测值受到的观测噪声远大于相位观测值受到的观测噪声,所以可以使用载波相位观测值来平滑伪距^[28]。

$$\bar{P}_{i+1} = \omega_{i+1} P_{i+1} + (1 - \omega_{i+1})(\bar{P}_i + \lambda \Delta \Phi) \quad (11)$$

式中, \bar{P}_{i+1} 表示第 $i+1$ 历元的伪距平滑值; ω_{i+1} 表示第 $i+1$ 历元的平滑时间常数; P_{i+1} 表示第 $i+1$ 历元的伪距观测值; $\Delta \Phi$ 为相邻历元间的相位观测值之差,即 $\Delta \Phi = \Phi_{i+1} - \Phi_i$ 。

多普勒观测值与相位观测值之间的关系为:

$$\Delta d_{i+1} = \Phi_{i+1} - \Phi_i = \int_i^{i+1} D dt \approx \frac{1}{2} \Delta t (D_i + D_{i+1}) \quad (12)$$

式中, Δt 为采样时间间隔。

于是可将相位观测值替换为多普勒观测值,将式(12)代入式(11)得^[29]:

$$\bar{P}_{i+1} = \omega_{i+1} P_{i+1} + (1 - \omega_{i+1})(\bar{P}_i + \Delta d_{i+1}) \quad (13)$$

其中,平滑时间常数 ω_{i+1} 可根据多普勒观测值的时变过程确定。再将式(13)代入式(5)得:

$$m_{\Delta N_1} = \pm \sqrt{2m_\phi^2 + \left(\frac{\Delta t}{2}\right)^2 2m_D^2} \quad (15)$$

相位伪距组合法阈值 $m_{\Delta N_2}$ 可表示为:

$$m_{\Delta N_2} = \pm \sqrt{2m_\phi^2 + 2m_P^2} \quad (16)$$

不同的接收机给出的观测值精度不同,一般来说 L_1 和 L_2 的相位测量误差为 $m_\phi = \pm 0.01$ 周,多普勒观测以及伪距观测值的误差分别为 $m_D = \pm 3$ cm/s, $m_P = \pm 5$ cm。参考式(15)、式(16),考虑使用的多普勒平滑伪距观测值,根据式(14),经过误差传播定律推导得多普勒积分辅助相位伪距组合法阈值 $m_{\Delta N_3}$ 的表达式为:

合,更精确地探测出连续周跳。

当该历元产生周跳,那么下一个历元的探测公式为:

$$\Delta N = \text{int} \left[\frac{\Phi_{i+1} - (\Delta d_i + \Phi_{i-1}) - (\bar{P}_{i+1} - P_i)}{\lambda} \right] \quad (18)$$

在采样率为 1 s 时,多普勒积分法探测周跳的能力可达到 0.5 周左右^[11],通过将多普勒观测值和相位伪距组合法相结合,可以降低伪距噪声对周跳探测的影响,从而达到探测小周跳的目的。

相对于粗差,周跳只会使一个历元的周跳估值产生跳变,而人为加粗差则会使两个历元的周跳估值向相反的方向跳跃。针对这一特点,本文提出了以下判别周跳和粗差的方法。

设相邻历元间的模糊度之差为 ΔN_i ,相隔一个历元的两个模糊度之差为 ΔN_{i+1} ,若 $|\Delta N_i| > \xi$ 且 $|\Delta N_{i+1}| > \xi$ 时,表示发生了周跳或粗差。在满足前面条件的基础上,当 $\Delta N_{i+1} - \delta \leq \Delta N_i \leq \Delta N_{i+1} + \delta$ 时,则表示发生了周跳;当 $\Delta N_i > \Delta N_{i+1} + \delta$ 或 $\Delta N_i < \Delta N_{i+1} - \delta$ 时,则表示出现了粗差。其中, ξ 为周跳探测的阈值, δ 为受到的噪声影响。根据探测的周跳与实际加入周跳的差值,本文将该噪声设置为 0.15 周。

图 1 给出了多普勒积分辅助相位伪距组合法的流程。该方法分为以下 4 步:

1) 通过单频接收机实时接收单频多普勒、伪距以及载波相位观测值。

2) 设定时间平滑常数,并使用多普勒积分值对伪距观测值进行平滑处理,再进行历元间差分。

3) 在此基础上,计算多普勒积分辅助相位伪距组合法的阈值,并利用该方法对周跳进行探测,判断该历元的周跳估值是否超过了阈值,若超过了阈值,则用多普勒积分值推估其无周跳的观测值。

4) 重复步骤 2)~3) 判断下一历元的周跳估值是否也超过阈值,如果下一历元的周跳估值超过阈值,则立即判断两个历元周跳估计是否相似,根据相似程度区分粗差与周跳,如果两个历元的周跳估值相差在一定范围内,则表示发生了周跳;当该周跳估值超过既定范围时,则表示出现了粗差。之后回到步骤 2) 继续下一历元的周跳探测。此处的范围根据探测的周跳与实际加入周跳的差值确定。

3 实验算例

实验采用 2020 年 3 月 15 日 13 时到 16 时在中国河南省郑州市采集到的车载动态实时单频数据,截取其中 G03 卫星 L_1 频点上连续 500 个历元的动态观测数据进行实时实验。在验证数据完整性的基础上,利用 GNSSer 软件^[30-32]实现 Tur-

boEdit 算法探测并修复周跳,利用数据探测法探测并剔除粗差,得到一组“干净”的数据进行实验。

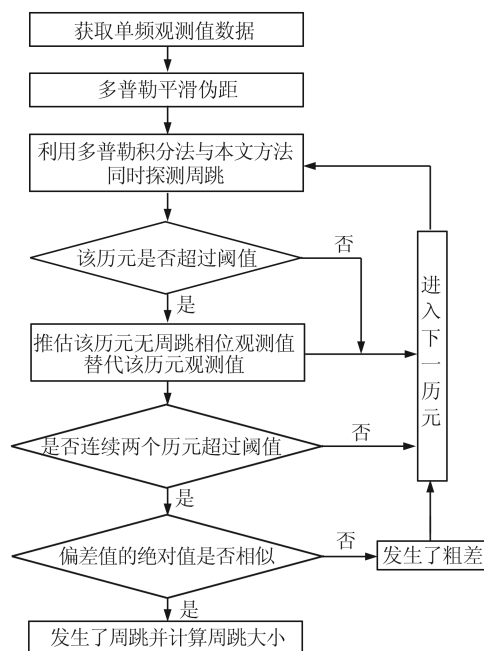


图 1 多普勒积分辅助单频周跳探测流程

Fig.1 Flowchart of Doppler Integral Aided Single Frequency Cycle Slip Detection

实验研究了人为添加周跳前后 3 种周跳探测方法的能力,与其他两种探测方法相比,多普勒积分辅助相位伪距组合法的周跳估值在不同采样率下的变化情况;在卫星高度角发生变化时,每一种探测方法所能探测到的最小周跳;在连续 3 个历元发生周跳时,多普勒积分辅助相位伪距组合法准确地探测出周跳所在历元的能力;并进一步分析了添加粗差后,多普勒积分辅助相位伪距组合法区分周跳和粗差的能力。

3.1 实验 1: 不同采样率条件

在该实验中,依次使用相位伪距组合法、多项式拟合法辅助相位伪距组合法和多普勒积分辅助相位伪距组合法对不同采样率的数据进行算例分析,结果如图 2 和表 1 所示。

从表 1 和图 2 中可以看出,无论是低采样率数据还是高采样率数据,多项式拟合法辅助相位伪距组合法与相位伪距组合法周跳估值的变化趋势基本一致,探测周跳的能力并无明显提高。这是因为在采用多项式拟合相位伪距组合观测值时,虽然避免了无周跳部分伪距观测值的噪声影响,但有周跳的伪距观测值仍存在较大的噪声影响,而且多项式拟合时还存在一定的拟合偏差。

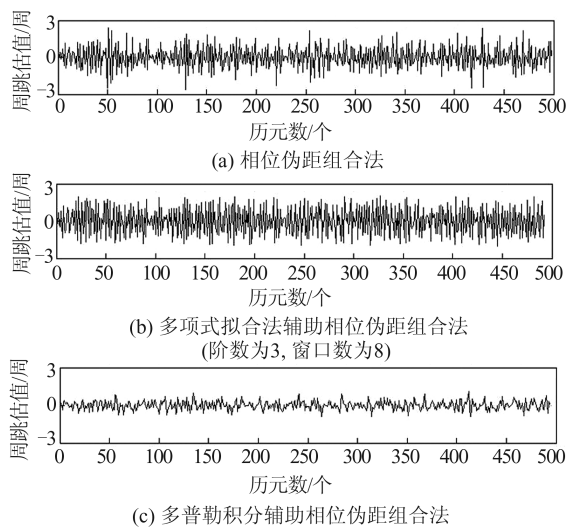


图2 1 s采样率原始数据

Fig.2 Raw Observation Data with 1 s Sampling Rate

从表1中可以看出,相较于相位伪距组合法

表1 不同采样率原始数据偏差

Tab.1 Deviation of Raw Data with Different Sampling Rates

采样率/s	最小偏差/周			最大偏差/周		
	相位伪距组合法	多项式拟合法辅助 相位伪距组合法	多普勒积分辅助相 位伪距组合法	相位伪距组合法	多项式拟合法辅 助相位伪距组合 法	多普勒积分辅助 相位伪距组合法
1	-2.238 4	-1.997 6	-0.902 7	2.422 6	1.992 4	0.925 5
2	-2.254 6	-2.001 5	-1.103 8	2.432 7	2.026 7	1.084 6
3	-2.287 4	-2.035 9	-1.355 9	2.456 8	2.084 6	1.235 6
4	-2.310 9	-2.084 7	-1.567 1	2.477 1	2.1075	1.599 1
5	-2.339 4	-2.107 3	-1.740 9	2.488 7	2.132 4	1.722 4
15	-2.460 2	-2.326 4	-2.313 7	2.498 1	2.368 4	2.247 0

方案1:在采样率为1 s的数据中,分别在第50、200、400历元处加入1周、3周和10周的周跳。方案2:在采样率为5 s的数据中,分别在第30、50、80历元处加入1周、3周和10周周跳。结果如图3和图4所示。

对比图3与图4可见,将采样间隔从1 s变为5 s后,多项式拟合法辅助相位伪距组合法与传统相位伪距组合法的周跳估值仍在2周左右,可探测出3周及以上的周跳。但是由于多普勒观测值易受采样间隔的影响,多普勒积分辅助相位伪距组合法的周跳估值从0.5周上升为2周左右,从可以探测到1周左右的小周跳到只能探测到3周及以上的周跳。

多普勒积分辅助相位伪距组合法提高了相位伪距组合法的周跳探测能力,相对于多普勒积分法和多项式拟合法辅助相位伪距组合法也有较大的改进。该方法在采样率较高时,可以准确检测到周跳的大小,甚至能探测到1周的小周跳;

以及多项式拟合法辅助相位伪距组合法,多普勒积分辅助相位伪距组合法整体偏差较小,可以探测出小周跳。在采样间隔达到15 s后,多普勒积分辅助相位伪距组合法的周跳估值仍维持在2周左右,即可以探测3周及以上周跳。其原因在于,在采样率较低时,该方法能够通过调整平滑时间常数,克服采样间隔对多普勒观测值的影响,以达到提高周跳探测率的目的;在采样率较高的情况下,该方法可以通过将平滑时间常数调小,从而探测出1周的小周跳。

无周跳数据的实验结果表明,改进后的方法无论采样率如何,均优于其他两种方法。但由于周跳会影响后续历元的观测值,所以需要在数据中加入周跳,进一步分析3种方法探测周跳的能力。

在低采样率下,仍能探测3周及以上周跳,克服了采样间隔对多普勒观测值的影响。

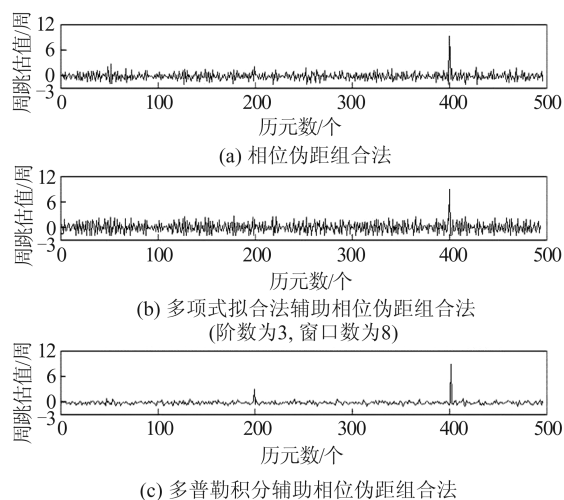


图3 方案1:1 s采样率加入周跳数据

Fig.3 Scheme 1: Adding Cycle Slips to Observation Data with 1 s Sampling Rate

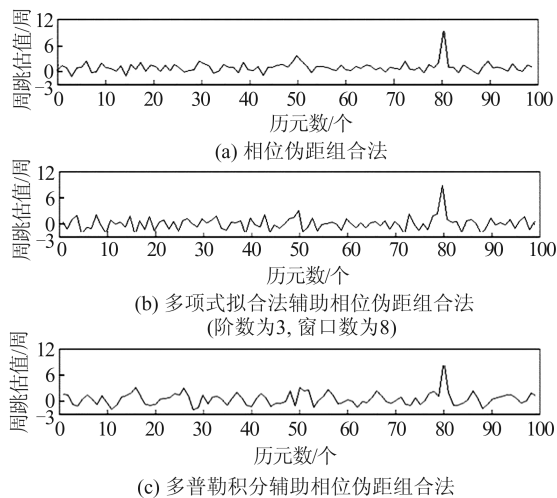


图 4 方案 2: 5 s 采样率加入周跳数据

Fig.4 Scheme 2: Adding Cycle Slips to Observation Data with 5 s Sampling Rate

3.2 实验 2: 不同卫星高度角变化条件

由于实验 1 截取的卫星高度角较高, 电离层延迟对相位伪距组合法的影响不大, 不能反映多普勒积分辅助相位伪距组合法在卫星高度角变化时的优越性。从原数据中重新选取一段高度角从 75° 到 5° 、采样间隔为 1 s 的观测数据进行实验。结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 卫星高度角对相位伪距组合法的影响最大, 而对另外两种方法的影响较小。其原因主要是: 卫星高度角快速变化时, 相位伪距组合观测值变化很大, 而多项式拟合法和多普勒积分法基本上不受卫星高度角的影响。因此, 为避免误判漏判, 传统的相位伪距组合法的阈值应设为 10 周, 而多项式拟合法辅助相位伪距组合法的阈值应设为 6 周, 多普勒积分辅助相位伪距组合法的阈值应设为 3 周。

实验结果表明, 多项式拟合法辅助相位伪距组合法、多普勒积分辅助相位伪距组合法均较传统的相位伪距组合法有较大改善, 但多普勒积分辅助相位伪距组合法的改进效果更为明显。

分析图 5 可以得出, 在 1 000 历元之前, 相位伪距组合法的最大周跳估计值仅为 2.6 周; 而在 1 000 历元之后, 由于卫星高度角降低, 电离层延迟对估计值的影响增大, 最大周跳估计值突变为 8.8 周。也就是说, 相位伪距组合法只能探测到 9 周及以上周跳。同样, 多项式拟合法辅助相位伪距组合法、多普勒积分辅助相位伪距组合法也受到相位伪距观测值的影响, 所以卫星高度角同样会影响它们的探测精度。可见此时多项式拟合法辅助相位伪距组合法的最大周跳估计值从 1.9

周变为 5.1 周, 也就是只能探测到 6 周及以上的周跳, 与传统相位伪距组合法相比, 可以减少卫星高度角的变化带来的影响。虽然存在伪距观测噪声的影响, 但多普勒积分辅助相位伪距组合法继承了多普勒积分法受卫星高度角影响较小这一特点, 其最大周跳估计也仅为 2.9 周, 即高度角很小时仍可探测 3 周的周跳。当卫星高度角较小时, 可以设置较小的时间平滑参数, 避免受到过大的伪距噪声影响, 从而克服卫星高度角对相位伪距组合观测值的影响。

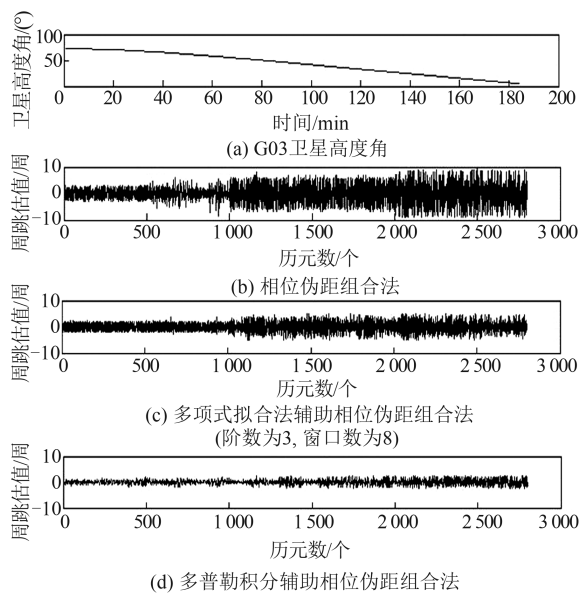


图 5 3 种方法受高度角变化的影响

Fig.5 Influence of Three Methods Under the Change of Elevation Angle

3.3 实验 3: 针对连续周跳的探测能力

在采样率为 1 s 的数据中, 分别在第 50、51、52 处加入 3 周、4 周、5 周周跳, 对比 3 种方法探测连续周跳的准确性。

根据图 6 所示的实验结果, 相位伪距组合法只探测出了第 50 历元的周跳, 而多项式拟合法辅助相位伪距组合法则探测出了第 50、52 历元的周跳, 且由于连续周跳的出现, 这两种方法在计算周跳大小时都会出现偏差。相位伪距组合法探测到的第 50 历元的周跳为 4 周, 而多项式拟合法辅助相位伪距组合法探测到的第 50、52 历元的周跳都为 3 周。反观多普勒积分辅助相位伪距组合法, 不仅可以探测到第 50、51、52 历元的周跳, 而且精确地探测到了第 3、4、5 周的周跳。说明其受连续历元周跳的影响很小, 可以忽略不计。

3.4 实验 4: 针对粗差的判别能力

对上述 1 s 采样率的数据, 根据 §2 中的周跳

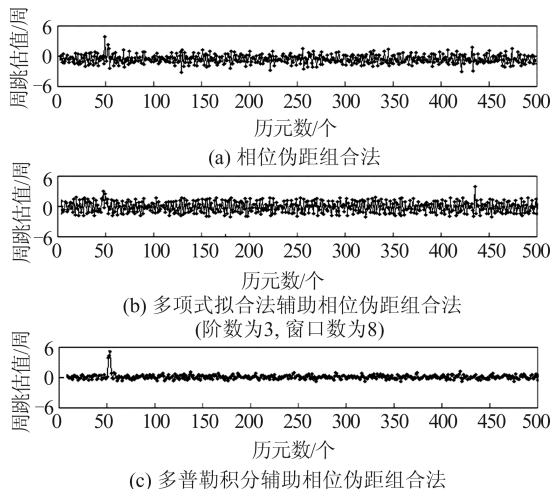


图6 1 s采样率加入连续周跳数据

Fig.6 Adding Continuous Cycle Slips to Observation Data with 1 s Sampling Rate

粗差判别方法,分别采取以下两种方案分析4种方法对周跳与粗差的分辨能力。方案1:在第50历元加入3周粗差,在第100历元加入5周周跳。方案2:在第50历元加入8周粗差,在第100历元加入3周周跳,3种方法的探测结果如图7与图8所示。从图7与图8中可以看出,无论加入大粗差或小粗差,3种方法均可分辨出周跳与粗差,而不管是在周跳前或周跳后加入粗差,均可准确地探测出周跳与粗差所发生的历元。

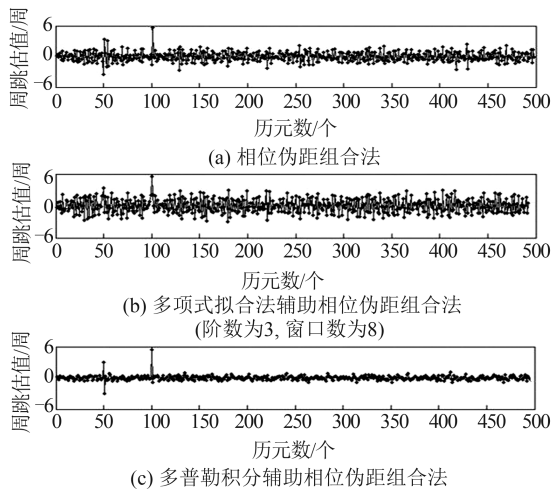


图7 方案1:加入小粗差探测结果

Fig.7 Scheme 1: Detection Result of Adding Small Gross Error Detection to Observation Data

实验结果表明,产生粗差时,相邻两个历元会产生相反的跳变,而当周跳发生时,只会在该历元发生跳变。另外,多项式拟合法辅助相位伪距组合法与相位伪距组合法有相似的周跳和粗差探测率,但探测精度更高。与这两种方法相比,本文提出的多普勒积分辅助相位伪距组合法

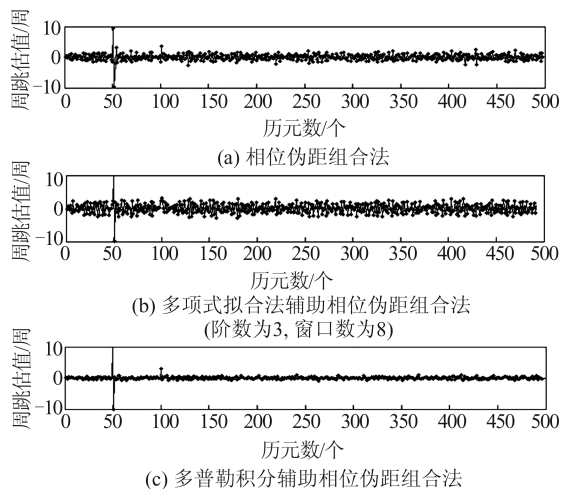


图8 方案2:加入大粗差探测结果

Fig.8 Scheme 2: Detection Result of Adding Large Gross Error Detection to Observation Data

不仅具有较高的周跳和粗差探测能力,而且能够更精确地探测出周跳和粗差的大小。

4 结 语

考虑到相位伪距组合法只能探测较大周跳,且受卫星高度角变化的影响较大,本文提出了一种动态单频周跳探测方法,即多普勒积分辅助相位伪距组合法。该方法利用了多普勒观测值受噪声影响小的特点,首先通过多普勒观测值对伪距观测值进行平滑,将载波相位观测值与平滑后的伪距观测值组合以探测周跳;然后利用多普勒积分值推估发生周跳历元处的无周跳载波相位数据,并通过设定周跳与粗差的判定条件,更准确的区分出周跳以及粗差;最后,采用不同采样率、不同高度角变化、包含连续周跳和包含大小粗差的数据,验证了本文提出的方法在单频周跳探测方面的优越性,得到了以下结论:

1)相对于传统的相位伪距组合法,多普勒积分辅助相位伪距组合法将3种观测值组合在一起,通过改变时间平滑参数来调整相位伪距组合观测值和多普勒观测值之间的权。如果将时间平滑参数设为常数0,则周跳探测公式为多普勒积分法;如果将时间平滑参数设为常数1,则周跳探测公式为相位伪距组合法。与已有两种探测方法相比,无论是在不同的采样率还是在不同的高度角下,本文提出的方法都可以通过调节时间平滑参数探测到更小的周跳,并准确探测出周跳的大小。

2)在任意粗差大小条件下,多普勒积分辅助相位伪距组合法均能够区分粗差与周跳,且精确

判断出粗差、周跳大小以及它们所在的历元。对连续周跳而言,传统的相位伪距组合法和多项式拟合法辅助相位伪距组合法都无法准确探测。而本文方法不仅可以准确地探测出周跳发生时的历元,而且可以更加精确地确定连续周跳的大小。

参 考 文 献

- [1] Wang Lingxuan, Gan Yu, Sui Lifen, et al. INS-Aided Single-Frequency Cycle Slip Detection for Kinematic GNSS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(3): 364-370 (王凌轩, 甘雨, 隋立芬, 等. INS辅助的实时动态GNSS单频周跳探测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(3): 364-370)
- [2] Yi Zhonghai, Chen Yuanjun. An Improved GPS Fast Ambiguity Resolution Algorithm with Epoch-Differenced Coordinate Information [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4): 489-494 (易重海, 陈源军. 顾及历元间坐标差信息的GPS模糊度快速固定改进方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(4): 489-494)
- [3] Chen Zhengsheng, Zhang Qinghua, Cui Yang, et al. Single Frequency Carrier Smoothing Pseudorange Algorithm and Accuracy Analysis Based on Moving Window [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 964-973 (陈正生, 张清华, 崔阳, 等. 单频载波相位移动开窗平滑伪距算法及精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(7): 964-973)
- [4] Zou Xuan, Li Zongnan, Chen Liang, et al. A New Cycle Slip Detection and Repair Method Based on Epoch Difference for a Single-Frequency GNSS Receiver [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(10): 1406-1410 (邹璇, 李宗楠, 陈亮, 等. 一种历元间差分单站单频周跳探测与修复方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(10): 1406-1410)
- [5] Hu Jiaxing, Liu Lilong, Song Yuanming, et al. Summary of GPS Cycle Slip Detection Method [J]. *GNSS World of China*, 2010, 35(4): 67-70 (胡加星, 刘立龙, 宋元明, 等. GPS周跳探测方法综述[J]. 全球定位系统, 2010, 35(4): 67-70)
- [6] Zhu Jiangmiao, Yan Di, Gao Yuan, et al. The Method for Single-Frequency Cycle Slip Detection and Repairation Based on Modified EEMD and LSSVM [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(3): 491-497 (朱江淼, 闫迪, 高源, 等. 基于改进EEMD和LSSVM的单频周跳探测与修复方法[J]. 计量学报, 2019, 40(3): 491-497)
- [7] Wang Cheng, Wang Jiexian. Cycle Slip Detection and Correction of Single-Frequency Un-differenced Phase Observation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(9): 1393-1398 (王成, 王解先. 单频非差相位观测值的周跳探测与修复方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(9): 1393-1398)
- [8] Teng Yunlong, Shi Yibing, Zheng Zhi. Algorithm of Cycle-Slip Detection and Correction in Single-Frequency Carrier Phase [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(8): 1700-1705 (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)
- [9] Zhang Xin, Cai Chenglin, Wu Guozeng, et al. An Improved Doppler Detection Method for Cycle Slip Detection [J]. *Aerospace Control*, 2016, 34(5): 9-13 (张忻, 蔡成林, 吴国增, 等. 一种改进型多普勒周跳探测方法[J]. 航天控制, 2016, 34(5): 9-13)
- [10] Cai Shixiang, Zhang Xiaohong, Li Xingxing, et al. A Modified Method for Cycle Slips Detection Based on Polynomial Fitting [J]. *Journal of Geomatics*, 2009, 34(5): 1-3 (蔡诗响, 张小红, 李星星, 等. 一种基于多项式拟合的单频周跳探测改进方法[J]. 测绘信息与工程, 2009, 34(5): 1-3)
- [11] Zheng Jianlei, Huang Zhangyu, Wei Jinde, et al. Study on Dealing Method of Cycle Slips in Single Frequency Precise Point Positioning (SFPPP) [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2014(5): 8-11 (郑建雷, 黄张裕, 魏锦德, 等. 单频精密单点定位中周跳处理方法研究[J]. 勘察科学技术, 2014(5): 8-11)
- [12] Yuan Bo, Bai Zhengdong, Fu Chunhao. A New Method for Cycle Slip Determination in Single-Frequency Phase Observation Based on Polynomial Fitting Method [J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2011, 39(12): 63-66 (原波, 白征东, 付春浩. 一种基于多项式拟合法的新的单频周跳探测方法[J]. 工程勘察, 2011, 39(12): 63-66)
- [13] Pei Jing, Ma Ying, Liu Chun. Research and Improvement of Polynomial Fitting Method in Cycle Slip Detection [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(11): 1828-1834 (裴晶, 马颖, 刘春. 多项式拟合法在周跳探测中的研究与改进[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1828-1834)
- [14] Han S. Quality-Control Issues Relating to Instantaneous Ambiguity Resolution for Real-Time GPS Kinematic Positioning [J]. *Journal of Geodesy*, 1997,

- 71(1): 351-361
- [15] Shen Chunming, Wang Aisheng. Detect Cycle Slips Using Doppler Integration[J]. *Urban Geotechnical Investigation and Surveying*, 2006(1): 24-26 (申春明, 王爱生. 用多普勒积分检测周跳[J]. 城市勘测, 2006(1): 24-26)
- [16] Wang Ping, Hao Jinming, Shen Guokang, et al. Method for Dealing with Cycle Slips in Single-Frequency Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2009, 26(5): 337-339(汪平, 郝金明, 沈国康, 等. 单频精密单点定位中周跳的处理方法[J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(5): 337-339)
- [17] Wei Ke, He Jiayu, Huang Tingrui. Discussion on Cycle Slip Detection Method of Single Frequency Precise Point Positioning[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2013(22): 52-53 (韦克, 何家裕, 黄庭睿. 单频精密单点定位的周跳探测方法探讨[J]. 黑龙江科技信息, 2013(22): 52-53)
- [18] Gao Shuliang, Huang Zhigang, Li Rui. Cycle Slips Detecting Approach for Single Frequency GPS Users [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(8): 1021-1025 (高书亮, 黄智刚, 李锐. 适用于单频GPS用户的周跳探测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(8): 1021-1025)
- [19] Zhou Zebao, Shen Yunzhong, Li Bofeng. Random Model Evaluation of GPS Doppler Observations[C] //China Technical Application Association for Global Positioning System, CTAAGPS, Beijing, China, 2008 (周泽波, 沈云中, 李博峰. GPS多普勒观测值的随机模型评估[C]. 中国全球定位系统技术应用协会, 北京, 2008)
- [20] Lai Yunbin, Zhao Chunmei, Li Zishen, et al. Research of Real-Time Cycle Slip Detection on Single Frequency Carrier Phase Data[C]. The 7th China Satellite Navigation Conference, CSNC, Changsha, China, 2016 (赖允斌, 赵春梅, 李子申, 等. 实时单频载波相位周跳探测方法研究[C]. 第七届中国卫星导航学术年会, 长沙, 2016)
- [21] Lei Yu, Gao Yuping. Accuracy Analysis of Detecting Cycle Slips Using Doppler Observation[J]. *GNSS World of China*, 2011, 36(1): 23-27 (雷雨, 高玉平. 多普勒探测周跳精度分析[J]. 全球定位系统, 2011, 36(1): 23-27)
- [22] Li Jinlong, Yang Yuanxi, Xu Junyi, 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 (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)
- [23] Habrich H. Geodetic Applications of the Global Navigation Satellite System (GLONASS) and GLONASS/GPS Combinations[D]. Bern: University of Bern, 1999
- [24] Ren Yongchao, Wang Shunxi, Fang Rongxin. Detection of Single-Frequency GPS Carrier Cycle Slips Based on Doppler Frequency Shift [J]. *Journal of Geomatics*, 2010, 35(1): 8-10 (任永超, 汪顺喜, 方荣新. 基于多普勒频移的单频载波相位周跳探测[J]. 测绘信息与工程, 2010, 35(1): 8-10)
- [25] Zheng Nanshan, Li Zengke. Application of Doppler Smoothing Pseudo-Range in GPS/INS Tightly-Coupled Navigation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(10): 1158-1162 (郑南山, 李增科. 多普勒平滑伪距在GPS/INS紧耦合导航中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(10): 1158-1162)
- [26] Zhou Z, Li B. Optimal Doppler-Aided Smoothing Strategy for GNSS Navigation[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1): 197-210
- [27] Cannon M E, Schwarz K P, Schwarz M, et al. A Consistency Test of Airborne GPS Using Multiple Monitor Stations [J]. *Bulletin Geodesique*, 1992 (66): 2-11
- [28] Zhang Baocheng, Ou Jikun, Yuan Yunbin, et al. Calibration of Slant Total Electron Content and Satellite-Receiver's Differential Code Biases with Uncombined Precise Point Positioning Technique[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(4): 447-453 (张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 利用非组合精密单点定位技术确定斜向电离层总电子含量和站星差分码偏差[J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 447-453)
- [29] Zhang Yonglin, Cai Changsheng, Sun Qingfeng, et al. Accuracy Analysis of Single Point Positioning Using Doppler Smoothed Pseudorange Observations [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2017, 5(3): 152-157 (张永林, 蔡昌盛, 孙清峰, 等. 多普勒观测值平滑伪距单点定位精度分析[J]. 测绘科学技术学报, 2017, 5(3): 152-157)
- [30] Li Linyang, Chen Zhengsheng, Cui Yang, et al. Design and Development of GNSS Data Processing Software GNSSer Based on Design Pattern [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(10): 1076-1080 (李林阳, 陈正生, 崔阳, 等. 基于设计模式的GNSS数据解算软件GNSSer的设计与开发[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(10):

- 1076-1080)
- [31] Li Linyang. Cloud Computing Method and Application of Large Scale Global GNSS Network [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2019(李林阳. 大规模全球 GNSS 网云计算方法与应用[D]. 郑州:信息工程大学, 2019)
- [32] Li Linyang, Lu Zhiping, Cui Yang, et al. Parallel Resolution of Large-Scale GNSS Network Undifference Ambiguity [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(12): 2637-2647

Doppler Integration Aided Kinematic Single-Frequency Cycle Slip Detection

YANG Kaichun¹ LÜ Zhiping^{1,2} LI Linyang^{1,3} KUANG Yingcai¹ XU Wei¹

¹ Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

² Institute of Space Science and Applied Technology, Harbin Institute of Technology(Shenzhen), Shenzhen 518055, China

³ State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: Objectives: The code-phase combination method is often used to detect cycle slips in kinematic single-frequency data, but its detection effect is greatly affected by pseudorange noise. Therefore it is necessary to combine other observations to reduce the effect of pseudorange noise for improving its detection capability. **Methods:** We propose a Doppler integration aided kinematic single-frequency cycle slip detection method, which first uses Doppler observations to smooth the pseudorange observations for reducing the noise of the pseudorange, and then gets epoch-difference values. In this way, we can significantly improve the capability of kinematic single-frequency cycle slip detection. The experiments use real-time dynamic data different sampling rates, altitude angle variations, continuous cycle slips and coarse differences, respectively. The simulated cycle slips of the different cycle are added at different epochs, and the continuous cycle slips are added at adjacent epochs. **Results:** The results show that the proposed method compared with the code-phase combination method and the code-phase combination method based on polynomial fitting can detect all the simulated cycle slips in real time. **Conclusions:** The method of Doppler integration aided kinematic single-frequency cycle slip detection can significantly improve the capability of the single-frequency cycle slips detection.

Key words: kinematic single-frequency cycle slip detection; Doppler integration method; code-phase combination method; epoch-difference; continuous cycle slips

First author: YANG Kaichun, postgraduate, specializes in GNSS data processing. E-mail: 413729378@qq.com

Corresponding author: LÜ Zhiping, PhD, professor. E-mail: ssscenter@126.com

Foundation support: Shenzhen Science and Technology Program(KQTD20180410161218820); the State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics Open Fund (SKLGED2020-3-3-E).

引文格式: YANG Kaichun, LÜ Zhiping, LI Linyang, et al. Doppler Integration Aided Kinematic Single-Frequency Cycle Slip Detection[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(11):1860-1869. DOI:10.13203/j.whugis20200424(杨凯淳, 吕志平, 李林阳, 等. 多普勒积分辅助的动态单频周跳探测[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, 47(11):1860-1869. DOI:10.13203/j.whugis20200424)