

# INS 辅助的实时动态 GNSS 单频周跳探测

王凌轩<sup>1</sup> 甘 雨<sup>2</sup> 隋立芬<sup>2</sup> 田 源<sup>2</sup> 刘乾坤<sup>2</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079  
2 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

**摘 要:**采用全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)模糊度固定解可提高 GNSS/惯性导航系统(inertial navigation system, INS)组合导航定位精度,而在复杂环境下,单频 GNSS 难以实现完善的实时动态周跳探测,影响 GNSS 模糊度保持。研究了星间单差与站星双差的 INS 辅助 GNSS 单频周跳探测检验量,重点分析检验量的误差特性。分析得出检验量误差主要与 INS 增量误差有关,受接收机至待检星与参考星之间星地矢量夹角的影响。提出了选取两颗参考星并优选探测检验量的方法,降低方位角因素的影响,提高周跳探测性能。周跳探测的阈值在滑动窗口内估计,对 INS 误差被 GNSS 误差淹没的部分进行抑制,充分反映 INS 误差影响,阈值估计具有较强的自适应性。

**关键词:**GNSS/INS;周跳;单频;参考星;方位角;滑动窗口

**中图分类号:**P228 **文献标志码:**A

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)周跳探测与模糊度固定是高精度 GNSS/惯性导航系统(inertial navigation system, INS)组合定位定姿的关键问题。GNSS 周跳探测已有较多研究成果,其中,多项式拟合<sup>[1-2]</sup>、高次差<sup>[1-2]</sup>、多谱勒<sup>[3]</sup>、三差法<sup>[4]</sup>难以用于动态情况;MW(Moulborne-Wuebbena)组合<sup>[5]</sup>、电离层残差<sup>[6]</sup>及三频组合<sup>[7]</sup>无法直接探测单一频点周跳;伪距相位组合<sup>[8]</sup>探测不到小周跳,利用(1,-1)和(-7,9)组合可提高精度,需联合解算才能确定单一频点周跳,(1,-1)组合噪声水平依然较高<sup>[9]</sup>。文献[10-11]通过惯性输出积分所得位置解,辅助载波相位观测值估计当前历元模糊度,与存储的之前历元已固定模糊度作差分构成检验量,而当 GNSS 失锁时间较长时,受 INS 误差漂移的影响,模糊度估计精度下降。文献[12]提出采用近似公式计算位置增量,前后历元差分作检验量,会带来多余误差。之后有学者提出精密单点定位背景下的惯性辅助检验量,文献[13-14]用 INS 辅助的 GNSS 双频观测值(1,-1)与(4,-5)宽巷组合探测周跳,没有分析探测阈值,采用固定值 0.5 周。一系列解决方法相继提出<sup>[15-20]</sup>,但均未对 INS 辅助 GNSS 周跳探测检验

量的误差特性进行深入分析,不能反映 INS 误差的具体影响,未采用具有针对性的阈值估计算法。

本文推导了星间单差与站星双差的 INS 辅助 GNSS 单频周跳探测检验量,分析了检验量的误差特性,组合使用两颗不同参考星构成的检验量,削弱方位角造成的检验量误差。本文还比较了双差和单差检验量,推荐在组合导航中使用单差检验量,并提出了滑动窗口估计阈值的方法,对 INS 误差被 GNSS 误差淹没的部分进行抑制,从而可充分反映 INS 误差影响,自适应调整探测阈值。本文利用组合系统车载动态导航数据进行实验,验证了 INS 辅助实时动态 GNSS 单频周跳探测算法的性能。

## 1 INS 辅助 GNSS 周跳探测检验量

GNSS 星间单差观测方程由接收机  $j$  对卫星  $p, q$  的载波相位观测方程差分得到:

$$\lambda \nabla \Phi_j^{p,q} = \nabla \rho_j^{p,q} - \lambda \nabla N_j^{p,q} - \nabla \delta t^{p,q} - \nabla d_I + \nabla d_T + e_{\nabla \Phi} \quad (1)$$

式中, $\lambda$  为波长; $\nabla$  为星间作差算子; $\Phi$  为载波相位观测值; $\rho$  为星地距离; $N$  为整周模糊度; $\delta t^{(\cdot)}$  为卫星钟差(从星历中获取); $d_I$  和  $d_T$  分别为电离层延

迟和对流层延迟;  $e$  为观测值噪声。

设基准站  $i$  与流动站  $j$  同步观测到  $p, q$  两卫星, 两接收机的星间单差观测方程作差分得到站星双差观测方程:

$$\lambda \nabla \Delta \Phi_{i,j}^{p,q} = (\nabla \rho_j^{p,q} - \nabla \rho_i^{p,q}) - \lambda \nabla \Delta N_{i,j}^{p,q} - \nabla \Delta d_I + \nabla \Delta d_T + e_{\nabla \Delta \Phi} \quad (2)$$

式中,  $\Delta$  为站间作差算子;  $e_{\nabla \Delta \Phi}$  表示双差噪声。

将此时 INS 位置参数  $\mathbf{X}_I$  代入  $\nabla \rho_j^{p,q}$  中, 略去上下标符号, 移项得到:

$$\nabla \Delta \Phi - \nabla \Delta \rho_I / \lambda + \nabla \Delta N = - \nabla \Delta d_I / \lambda + \nabla \Delta d_T / \lambda + e_{\nabla \Delta \Phi} \quad (3)$$

设之前  $t_m$  历元时刻已有固定模糊度  $\nabla \Delta N_{t_m}$ , 则当前历元  $t_k$  时刻的 INS 辅助 GNSS 周跳探测检验量  $T_{dd}$  可写作:

$$T_{dd} = \nabla \Delta \Phi - \nabla \Delta \rho_I / \lambda + \nabla \Delta N_{t_m} \quad (4)$$

采用该检验量需要存储  $t_m$  时刻 GNSS 模糊度固定整数解  $\nabla \Delta N_{t_m}$ , 但由于 GNSS 导航的脆弱性, 复杂环境下模糊度难以准确固定, INS 漂移将得不到高精度载波相位观测值的及时修正, 会导致检验量的探测性能降低, 这对于消费级惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 尤为明显<sup>[16]</sup>。

记  $\delta$  为历元间差分算子, 对式 (2) 作历元间差分得三差观测方程:

$$\delta \nabla \Delta \Phi = (\delta \nabla \rho_j - \delta \nabla \rho_i) / \lambda - \delta \nabla \Delta d_I / \lambda + \delta \nabla \Delta d_T / \lambda + e_{\delta \nabla \Delta \Phi} \quad (5)$$

因为静态定位中  $\delta \nabla \rho_j$  可由概略坐标求取, GNSS 静态模式中可用三差常数或平差残差法判断周跳<sup>[4]</sup>。动态定位中, 载体坐标变化剧烈, 此法不适用于探测小周跳。

将  $t_{k-1}$  和  $t_k$  时刻的 INS 位置  $\mathbf{X}_{I,k-1}$  和  $\mathbf{X}_{I,k}$  代入式 (5), 可得:

$$\delta \nabla \Delta \Phi = \delta \nabla \rho_I / \lambda - \delta \nabla \rho_i / \lambda - \delta \nabla \Delta d_I / \lambda + \delta \nabla \Delta d_T / \lambda + e_{\delta \nabla \Delta \Phi} \quad (6)$$

历元差分惯性辅助双差周跳检验量为:

$$T_{dd} = \delta \nabla \Delta \Phi - \delta \nabla \rho_I / \lambda + \delta \nabla \rho_i / \lambda \quad (7)$$

$t_{k-1}$  时刻的  $\mathbf{X}_{I,k-1}$  是 GNSS/INS 组合后的位置参数,  $t_k$  历元与  $t_{k-1}$  历元之间作差分后, 将消除部分 IMU 漂移误差。

图 1、图 2 分别为同一卫星的当前历元周跳探测检验量与历元差分周跳探测检验量, 每隔 120 s 模拟 5 s 部分失锁, 失锁期间未能固定模糊度。显然, 历元差分的方式在 INS 没有及时修正的情况下仍有良好的探测性能。

若采用星间单差观测值:

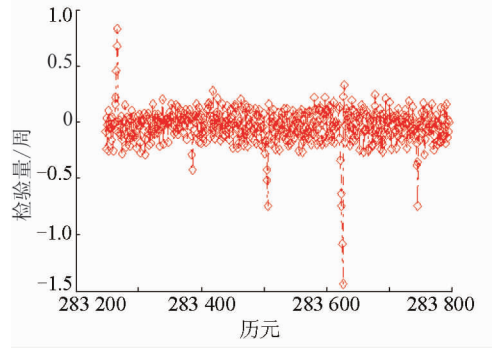


图 1 惯性辅助当前历元检验量

Fig. 1 Inertial Aided Single-Epoch Detection Term

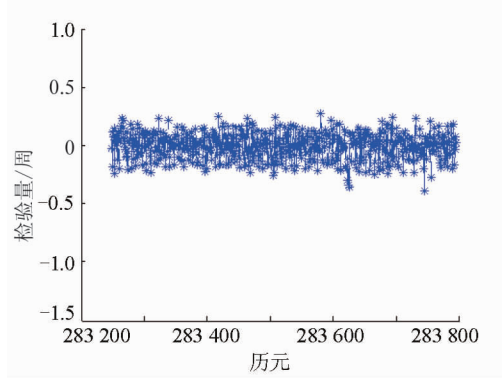


图 2 惯性辅助历元差分检验量

Fig. 2 Inertial Aided Time-Differenced Detection Term

$$\delta \nabla \Phi = \delta \nabla \rho_j / \lambda - \delta \nabla \delta t / \lambda - \delta \nabla d_I / \lambda + \delta \nabla d_T / \lambda + e_{\delta \nabla \Phi} \quad (8)$$

代入 INS 位置参数, 得辅助检验量  $T_{sd}$ :

$$T_{sd} = \delta \nabla \Phi - \delta \nabla \rho_I / \lambda - \delta \nabla \delta t / \lambda \quad (9)$$

而将非差观测值作历元间差分, 得到的惯性辅助周跳探测检验量  $T_{ud}$  为:

$$T_{ud} = \delta \Phi - \delta \rho_I / \lambda - \delta \nabla \delta t / \lambda \quad (10)$$

卫星钟差可从星历获得。然而非差观测方程不能消除接收机钟差, 检验量中包含了接收机石英钟钟速、钟漂的影响, 且该影响通常无法通过建模消除。因此受 GNSS 接收机钟差项的影响, 将无法有效探测周跳。

## 2 周跳探测检验量误差分析

除 GNSS 观测环境、载波相位测量精度外, INS 辅助 GNSS 周跳探测检验量的性能将受 IMU 精度水平的限制, 需要对卫星观测值受 IMU 误差的具体影响方式进行分析。

利用历元间接收机与卫星之间几何关系分析误差传播过程, 将  $t_{k-1}$ 、 $t_k$  历元接收机至卫星的空

间关系矢量分别记为 $\mathbf{r}_{k-1}$ 和 $\mathbf{r}_k$ ; GNSS 卫星和接收机两者的位置增量分别记为 $\mathbf{S}_k$ 、 $d\mathbf{X}_k$ 。前后距离差 $\delta\rho$ 可写作:

$$\begin{aligned}\delta\rho &= \rho_k - \rho_{k-1} = \mathbf{l}_k \cdot \mathbf{r}_k - \mathbf{l}_{k-1} \cdot \mathbf{r}_{k-1} = - \\ &\mathbf{l}_k \cdot d\mathbf{X}_k + (\mathbf{l}_k \cdot \mathbf{r}_{k-1} - \mathbf{l}_{k-1} \cdot \mathbf{r}_{k-1} + \mathbf{l}_k \cdot \mathbf{S}_k)\end{aligned}\tag{11}$$

式中,  $\mathbf{l}_k$  表示单位向量(方向余弦矢量)。

对于式(11)中等号右边的第二项, 设:

$$o(\mathbf{X}_{I,k-1}) = \mathbf{l}_k \cdot \mathbf{r}_{k-1} - \mathbf{l}_{k-1} \cdot \mathbf{r}_{k-1} + \mathbf{l}_k \cdot \mathbf{S}_k\tag{12}$$

不考虑星历误差的影响, 该词的误差主要由 IMU 位置  $\mathbf{X}_{I,k-1}$  的误差引起:

$$\Delta[o(\mathbf{X}_{I,k-1})] = (\mathbf{l}_k - \mathbf{l}_{k-1}) \cdot \Delta[\mathbf{X}_{I,k-1}]\tag{13}$$

式中,  $\Delta[\ ]$  表示真误差。以 GPS 卫星为例, GPS 星座中卫星距离地球表面平均高度为  $2.0 \times 10^7$  m, 运动速度平均为 3 800 m/s。组合系统接收机采样率通常在 1 Hz 以上, 相邻历元间站星矢量夹角  $\alpha$  可预估为:

$$\alpha \approx 3\,800 / (2.0 \times 10^7) = 1.9 \times 10^{-4}\tag{14}$$

$$\begin{aligned}|\mathbf{l}_k - \mathbf{l}_{k-1}| &= \sqrt{2 - 2\mathbf{l}_k \cdot \mathbf{l}_{k-1}} = \\ &\sqrt{2 - 2\cos\alpha} \approx 1.9 \times 10^{-4}\end{aligned}\tag{15}$$

根据式(15),  $\Delta[\mathbf{X}_{I,k-1}]$  达到百米量级时, 对  $\delta\rho$  的影响仅为厘米量级, 可见 IMU 的绝对位置漂移误差对距离差影响微弱。因此, 可以说距离差的误差主要是由 IMU 测量值得到的历元间积分增量  $d\mathbf{X}_k$  决定。故可推测当  $d\mathbf{X}_k$  达到一定的精度要求时, 即使在一段时间内未固定模糊度, 惯性辅助的周跳探测检验量仍能达到良好的探测性能。

接下来针对站星双差与星间单差检验量均需解算的  $\delta\nabla\rho$  项进行分析。由式(11)可得:

$$\begin{aligned}\delta\nabla\rho &= \nabla(-\mathbf{l}_k \cdot d\mathbf{X}_k + o(\mathbf{X}_{I,k-1})) = - \\ &\nabla\mathbf{l}_k \cdot d\mathbf{X}_k + o(\mathbf{X}_{I,k-1})\end{aligned}\tag{16}$$

$$\begin{aligned}\Delta[\delta\nabla\rho] &= -\nabla\mathbf{l}_k \cdot \Delta[d\mathbf{X}_k] = - \\ &(\mathbf{l}_k^q - \mathbf{l}_k^p) \cdot \Delta[d\mathbf{X}_k]\end{aligned}\tag{17}$$

式中,  $\nabla\mathbf{l}_k$  为比例因子, 反映 IMU 积分增量误差对各 GNSS 卫星周跳探测检验量的影响。

由式(15)可得  $\nabla\mathbf{l}_k$  的模:

$$|\nabla\mathbf{l}_k| = |\mathbf{l}_k^q - \mathbf{l}_k^p| = \sqrt{2 - 2\cos\beta}\tag{18}$$

式中,  $\beta$  表示接收机到卫星  $p$  和参考星  $q$  之间的星地矢量夹角。 $\beta$  越小则  $|\nabla\mathbf{l}_k|$  越大,  $\beta$  越大则  $|\nabla\mathbf{l}_k|$  越小。可见, GNSS 载波相位观测值的周跳探测检验量受  $d\mathbf{X}_k$  的误差影响主要由  $\beta$  角决定。相比于高度角而言, 方位角对  $\beta$  角影响较大, 接收机至  $p$ 、 $q$  之间方位角相差较小时, 所得的检验量误差会较小。因此, 周跳探测参考星的选取至关

重要, 需考虑方位角因素影响。

观测时 GNSS 可见卫星往往均匀分布于全方位角  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围, 如若仅选一颗参考星, 与参考星方位角相差大的可见卫星周跳探测检验量误差将被放大, 探测可靠性无法得到保证。考虑用两颗参考星进行周跳探测, 各待检星选用噪声相对小的探测检验量。由此, 周跳探测参考星的选取策略可概述为: 先由高度角、信噪比等选定原则确定一颗质量优的作为参考星; 再选与之方位角相差较大的(接近  $180^\circ$ )另一颗卫星作为第二参考星, 以削弱方位角因素的影响。

由上述分析可知, INS 辅助 GNSS 周跳探测检验量的误差主要包含了载波相位观测噪声  $\sigma_\Phi$  与 IMU 的增量误差  $\sigma_{\rho_I}$ , 即站星双差惯性辅助检验量  $T_{dd}$  的误差可表示为:

$$\begin{aligned}\sigma_{T_{dd}} &= \sqrt{\sigma^2(\delta\nabla\Delta\Phi) + \sigma^2(\delta\nabla\rho_I/\lambda)} = \\ &\sqrt{8\sigma_\Phi^2 + \sigma^2(\frac{\delta\nabla\Delta d_a}{\lambda}) + \sigma^2(\frac{\delta\nabla\rho_I}{\lambda})}\end{aligned}\tag{19}$$

式中,  $\sigma(\delta\nabla\Delta d_a/\lambda)$  表示大气折射延迟残余误差。同理, 星间单差惯性辅助检验量  $T_{sd}$  的误差可表示为:

$$\begin{aligned}\sigma_{T_{sd}} &= \sqrt{\sigma^2(\delta\nabla\Phi) + \sigma^2(\delta\nabla\rho_I/\lambda)} = \\ &\sqrt{4\sigma_\Phi^2 + \sigma^2(\frac{\delta\nabla d_a}{\lambda} + \frac{\delta\nabla\delta t}{\lambda} + \frac{\delta\nabla\rho_I}{\lambda})}\end{aligned}\tag{20}$$

对比式(19)与式(20), 显然  $\sigma_{\rho_I}$  对  $T_{dd}$  及  $T_{sd}$  影响相同, 如果下式成立:

$$\sigma^2(\frac{\delta\nabla d_a}{\lambda}) + \sigma^2(\frac{\delta\nabla\delta t}{\lambda}) < 4\sigma_\Phi^2 + \sigma^2(\frac{\delta\nabla\Delta d_a}{\lambda})\tag{21}$$

则  $T_{sd}$  的误差水平小于  $T_{dd}$ , 反之则  $T_{sd}$  的误差水平更高。如图 3、图 4, 分别为 PRN15 与 PRN29 两颗卫星的  $T_{sd}$  与  $T_{dd}$ 。图 3、图 4 中, 根据高度角、信噪比原则, 仅选定 PRN10 号星作为参考星。显然, 实验结果验证了  $T_{sd}$  噪声水平低于  $T_{dd}$ 。因此, 组合导航系统中, 受采样率高、历元间误差相关性强等因素影响, 更推荐采用星间单差检验量, 即使是在相对定位条件下, 如 GNSS 实时动态(real time kinematic, RTK)/INS 的组合。

在图 3 与图 4 中, 值得说明的是, 观测时段内 PRN15 的平均高度角约为  $49^\circ$ , PRN29 的平均高度角约为  $41^\circ$ , 但 PRN15 的噪声水平明显高于 PRN29。这是由于 PRN29 与 PRN10 之间方位角相差较小, 导致该星的星地矢量夹角  $\beta$  小, 检验量误差没有被 INS 增量误差放大。

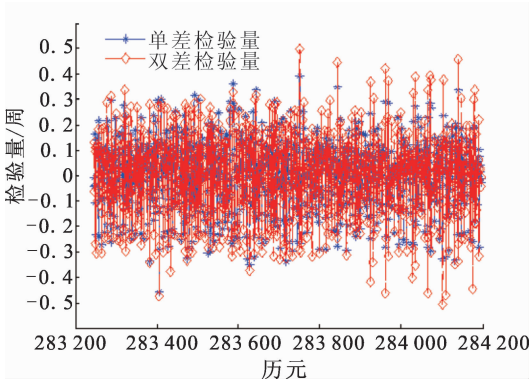


图 3 单差和双差检验量 (PRN15)

Fig. 3 Single Difference and Double Difference Detection Terms (PRN15)

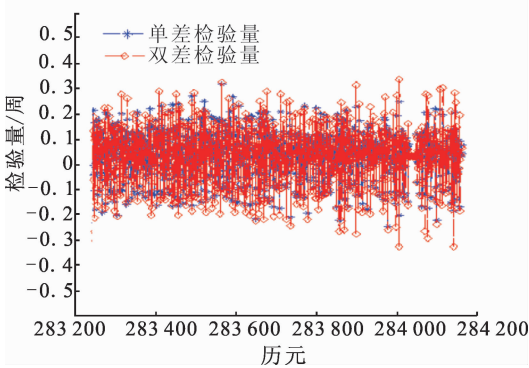


图 4 单差和双差检验量 (PRN29)

Fig. 4 Single Difference and Double Difference Detection Terms (PRN29)

### 3 周跳探测检验量阈值确定

相对而言,GNSS 的载波相位观测值误差量级远小于 IMU 位置增量误差,若采用检验量  $T_{sd}$  的 4 倍中误差作为阈值,探测 1 周小周跳就需要  $4\sigma_{T_{sd}} < 1$ ,则 IMU 增量误差至少需满足  $\delta\nabla\rho_l/\lambda < 0.25$ 。 $L_1$  频点对探测的要求比  $L_2$  频点高,以  $L_1$  频点为例:

$$\delta\nabla\rho_l < 0.0476 \quad (22)$$

采用本文提出的使用两组参考星作为检验量,  $|\nabla l_k|$  多数情况下均小于 1。因此,如果 IMU 在两历元间的位置增量误差小于 4.76 cm,就可探测出小周跳。

IMU 误差因素复杂,受载体运动影响以及元器件精度限制,动态漂移特性远不如载波相位观测值稳定。 $t_{k-1}$  历元 GNSS/INS 组合后的 IMU 导航参数也会残留有未校正误差,影响  $t_k$  时刻的 IMU 位置增量误差。有必要考虑额外采用宽度为  $m$  的滑动窗口  $(t_{k-m}, t_{k-1})$ ,使用窗口内数据估计周跳探测阈值。

惯性辅助单差探测检验量  $T_{sd}$  包含的 GNSS 噪声  $e_{\delta\nabla\Phi}$  标准差可记为  $\sigma_{e_{\delta\nabla\Phi}} = 2\sigma_\Phi$ ,则  $e_{\delta\nabla\Phi}$  的值主要落在  $[-4\sigma_\Phi, 4\sigma_\Phi]$  区间内(置信度 95% 左右)。INS 增量误差影响大于 GNSS 噪声,是阈值估计的主要参考。但当某些历元载体动态程度小,或前一历元的误差经组合滤波削弱得更“干净”时,这部分历元的 IMU 增量误差较小,对检验量的贡献值也在  $[-4\sigma_\Phi, 4\sigma_\Phi]$  范围内。这样,在整个滑动窗口内,这些历元的 INS 误差被 GNSS 噪声淹没,无法提取有效的 INS 信息。在这种情况下,需将所有满足  $|T_{sd}| \leq 4\sigma_\Phi$  的检验量剔除,保留其余部分对阈值进行估计,以充分反映 INS 误差的影响。若窗口内检验量的值均落在  $[-4\sigma_\Phi, 4\sigma_\Phi]$  内,则检验量主要受 GNSS 误差影响,对窗口的所有数据进行阈值估计。检验量阈值为:

$$D_{T_{sd}} = \begin{cases} 4\sigma_{T_{sd}} & (T_{sd}), \max(|T_{sd}|) \leq 4\sigma_\Phi \\ 4\sigma_{T_{sd}} & (|T_{sd}| > 4\sigma_\Phi), \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

### 4 计算与分析

以 GPS/INS 组合系统为例,车载实验于武汉市进行,观测时刻内可见卫星约 6~8 颗, GPS 采样率 1 Hz,INS 采样率 100 Hz。INS 陀螺零偏  $1^\circ/\text{h}$ ,加速度计偏置 0.1 mg (标称值),满足检验量对位置增量误差的要求。为方便验证本文方法,原始 GPS 数据经过预处理探测并修复了周跳。分别向在天顶均匀分布的 PRN2、PRN15 与 PRN29 3 颗卫星  $L_1$  载波相位观测值,每隔 30 s 加入 1 周小周跳,3 颗卫星的星地矢量方位角分别约为  $99^\circ$ 、 $199^\circ$ 、 $298^\circ$ 。按上文所述参考星选取策略,参考星选定为 PRN10 与 PRN26,PRN10、PRN26 的方位角分别约为  $10^\circ$ 、 $189^\circ$ 。使用构成的两组惯性辅助星间单差检验量  $T_{sd}$  进行探测,探测阈值采用宽度为 30 历元的滑动窗口进行估计。

图 5 至图 8 中蓝色星号“\*”表示周跳探测检验统计量的值,红色实线表示滑动窗口估计的阈值。图 5 至图 7 分别为以 PRN10 星为参考时 PRN2、PRN15、PRN29 的 INS 辅助 GPS 周跳探测结果;图 8 为以 PRN26 作为参考星时 PRN15 的探测结果。

分析以上周跳探测结果,可以得出:

1) 对于选取的 PRN2、PRN15、PRN29 这 3 颗卫星,本文提出的周跳探测检验量性能良好,可以探测出所有的小周跳。IMU 误差存在漂移,而数值小的 INS 误差会被 GNSS 误差淹没,将这



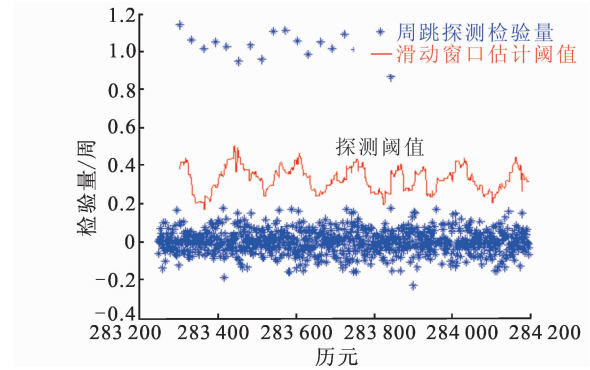


图 5 PRN2 探测结果(参考星: PRN10)

Fig. 5 Detection Results of PRN2 (Base PRN10)

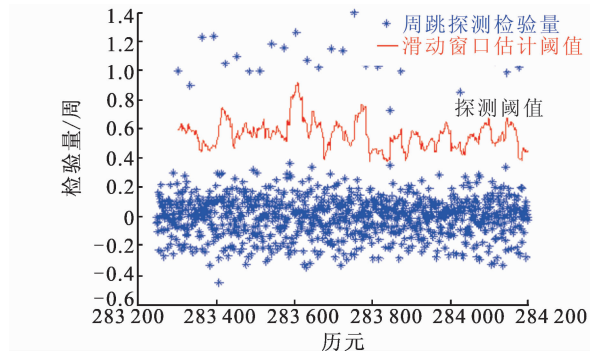


图 6 PRN15 探测结果(参考星: PRN10)

Fig. 6 Detection Results of PRN15 (Base PRN10)

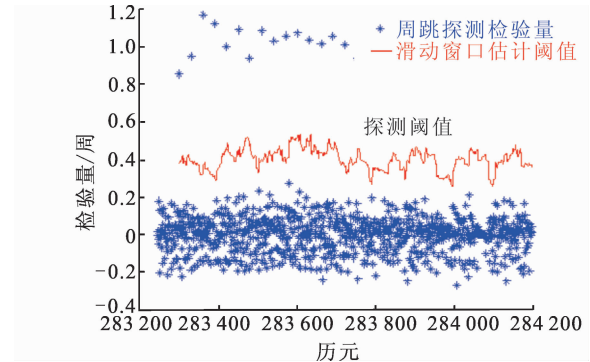


图 7 PRN29 探测结果(参考星: PRN10)

Fig. 7 Detection Results of PRN29 (Base PRN10)

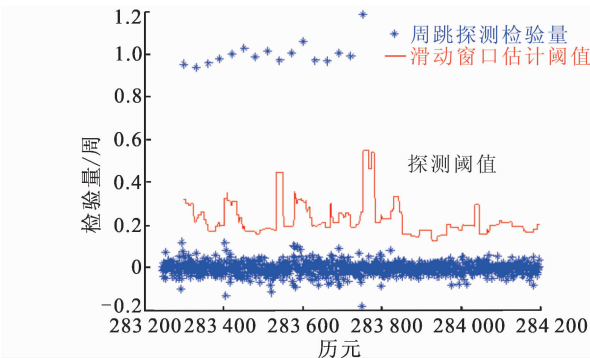


图 8 PRN15 探测结果(参考星: PRN26)

Fig. 8 Detection Results of PRN15 (Base PRN26)

分检验量进行剔除,使用滑动窗口估计周跳探测阈值,可抑制不显著的 INS 信息,阈值估计随

IMU 位置增量误差特性而自适应调整。  
2)仅选取一颗参考星,卫星与参考星间方位角相差小的探测检验量误差小,反之周跳探测检验量误差会被放大,易造成漏探与误探。  
3)本文方法可为每颗卫星选择误差更小的检验量,增强周跳探测的可靠性。对 PRN2 与 PRN29 号星,可选择 PRN10 号参考星构成周跳探测检验量,PRN15 号星应取 PRN26 作为参考星,以获得最优周跳探测性能。

5 结 语

单独使用 GNSS 很难实现完善的实时动态单频周跳探测。INS 能够提供额外的位置及位置增量信息,辅助计算周跳探测检验量中与星地几何距离相关的部分,使得前后历元差分后的星间单差或站星双差观测量能够用来探测周跳。

本文研究了 INS 辅助 GNSS 单频周跳探测检验量,得出:接收机至待检星与参考星之间的星地矢量夹角越大,IMU 的位置增量漂移误差将被放大,导致检验量性能降低;仅选择一个参考星时,容易造成某些卫星的检验量误差严重放大,在阈值估计方面也缺乏适应性。本文提出采用两组方位角相差较大的参考星组,并进行检验量优选,可降低方位角因素的影响,增强周跳探测性能;剔除 INS 误差被 GNSS 淹没时的检验量,结合滑动窗口的使用,可得到与 INS 误差特性变化相适应的阈值。

参 考 文 献

[1] Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS Surveying and Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005 (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)  
[2] Liu Jiyu. The Principle and Method of Navigation and Positioning Using GPS Satellites [M]. Beijing: Science Press, 2008(刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2008)  
[3] Li Zhenghang, Zhang Xiaohong. New Techniques and Precise Data Processing Methods of Satellite Navigation and Positioning [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009(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)  
[4] Yuan Hong, Wan Weixing, Ning Baiqi, et al. A New Cycle Slip Detection and Correction Method U-

- sing Triple Differences Solution [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1998, 27(3): 189-194 (袁洪, 万卫星, 宁百齐, 等. 基于三差解检测和修复 GPS 载波相位周跳新方法[J]. 测绘学报, 1998, 27(3): 189-194)
- [5] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199-202
- [6] Fang Rongxin, Shi Chuang, Wei Na, et al. Real-Time Cycle-Slip Detection for Quality Control of GPS Measurements [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(9): 1 094-1 098 (方荣新, 施闯, 魏娜, 等. GPS 数据质量控制中实时周跳探测研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(9): 1 094-1 098)
- [7] Li Jinlong, Yang Yuanxi, Xu Junyi, et al. Real-Time Cycle-Slip Detection and Repair on Code-Phase Combinations for GNSS Triple Frequency Undifferenced Observations [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(6): 717-723 (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): 717-723)
- [8] Chen Pinxin, Zhang Chuanyin, Huang Kunxue. Cycle Slips Detecting and Repairing by Use of Phase Reduce Pseudorange Law and Ionized Layer Remant Method of Difference [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(2): 120-125 (陈品馨, 章传银, 黄昆学. 用相位减伪距法和电离层残差法探测和修复周跳[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2): 120-125)
- [9] Tan Zhaowei. Investigations on Cycle Slip Detection and Correction in GPS Precise Point Positioning [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011 (谭兆伟. GPS 精密单点定位周跳探测与修复方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011)
- [10] Altmayer C. Enhancing the Integrity of Integrated GPS/INS Systems by Cycle Slip Detection and Correction [C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn, USA, 2000
- [11] Lee H K, Wang J L, Rizos C. Carrier Phase Processing Issues for High Accuracy Integrated GPS/Pseudolite/INS Systems [C]. The 11th IAIN World Congress, Berlin, Germany, 2003
- [12] Colombo O, Bhakra U, Evans A. Inertial-Aided Cycle-Slip Detection/Correction for Precise, Long-Baseline Kinematic GPS [C]. ION GPS 1999, Nashville, USA, 1999
- [13] Du Shuang, Gao Yang. Inertial Aided Cycle Slip Detection and Identification for Integrated PPP GPS and INS [J]. *Sensors*, 2012, 12: 14 344-14 362
- [14] Du Shuang. An Inertial Aided Cycle Slip Detection and Identification Method for Integrated PPP GPS/MEMS IMU System [C]. ION GNSS 2011, Portland, OR, USA, 2011
- [15] Liu Shuai, Sun Fuping, Zhang Lundong, et al. Instantaneous Re-convergence of Precise Point Positioning by Using INS-Aided Cycle-Slip Correction [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2015, 23(5): 607-614 (刘帅, 孙付平, 张伦东, 等. INS 辅助周跳修复以实现精密单点定位瞬时重新收敛[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(5): 607-614)
- [16] Gan Yu. GNSS/INS Integrated System Model Refining and Position and Attitude Determination Using Carrier Phase [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2015 (甘雨. GNSS/INS 组合系统模型精化及载波相位定位定姿[D]. 郑州: 信息工程大学, 2015)
- [17] Liu Qiankun, Sui Lifen, Xiao Guorui, et al. A Method of Determining the Weight Matrix for BDS DCB Resolution [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015, 32(5): 473-478 (刘乾坤, 隋立芬, 肖国锐, 等. 北斗系统差分码偏差解算中一种新的定权方法[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(5): 473-478)
- [18] Zhang Xiaohong, Guo Fei, Li Pan, et al. Real-Time Quality Control Procedure for GNSS Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 940-944 (张小红, 郭斐, 李攀, 等. GNSS 精密单点定位中的实时质量控制[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(8): 940-944)
- [19] Ma Guoju, Yu Baoguo, Jia Ruicai, et al. INS-Aided High Dynamic GNSS Rapid Acquisition and Stable Tracking [J]. *Radio Engineering*, 2016, 46(2): 23-26 (马国驹, 蔚保国, 贾瑞才, 等. INS 辅助 GNSS 高动态捕获跟踪技术研究[J]. 无线电工程, 2016, 46(2): 23-26)
- [20] Ye Ping. MEMS IMU/GNSS Ultralight Integration Navigation Technology [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011 (叶萍. MEMS IMU/GNSS 超轻量组合导航技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011)

INS-Aided Single-Frequency Cycle-Slip Detection for Kinematic GNSS

WANG Lingxuan<sup>1</sup> GAN Yu<sup>2</sup> SUI Lifan<sup>2</sup> TIAN Yuan<sup>2</sup> LIU Qiankun<sup>2</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

**Abstract:** Global Navigation Satellite System (GNSS) ambiguity fixed solution can greatly improve the accuracy of GNSS/inertial navigation system (INS) integrated system. But it is difficult to achieve perfect real-time dynamic single-frequency cycle-slip detection merely by GNSS observations especially in complex environment. Inertial aided cycle-slip detection term (DT) based on station-satellite double-differences and satellite single-difference observations are derived. The error characteristic of the DT is analyzed comprehensively. DT error is influenced by the error of INS positioning increment and this error of each satellite is related to the angle between its station-satellite vector and that vector of the base satellite. Thus, it is of importance to select base satellite. It is proposed that two group of DT can be used together by selecting two different base satellites. The threshold of detection is estimated in a moving window, where the DTs, whose INS error is submerged in GNSS error, are eliminated to reflect the effects of INS error. The threshold has strong self-adaptability.

**Key words:** GNSS/INS; cycle-slip; single-frequency; reference satellite; azimuth; sliding window

**First author:** WANG Lingxuan, PhD candidate, specializes in data processing of GNSS/INS integrated navigation. E-mail: geo\_wlx@163.com

**Corresponding author:** SUI Lifan, PhD, professor. E-mail: suilifen@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41674016, 41874036; the Innovative Foundation of Information Engineering University, No. XS201504.