

惯导辅助的无电离层与宽巷组合周跳探测与修复方法

黎蕾蕾¹ 杨 盛^{2,1} 柳景斌² 孙红星² 丁学文³
吴 宇¹ 任春华⁴ 彭 亮¹ 谢长城¹

1 重庆大学航空航天学院,重庆,400044
2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079
3 千寻位置网络有限公司,上海,200438
4 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室,重庆,400044

摘 要:由于卫星信号被遮挡、低信噪比或接收机运动等原因,载波相位观测值较正常值会发生周跳。为解决这一问题,基于精密单点定位与惯导组合系统,提出了一种有效的惯导辅助周跳探测与修复方法。该方法基于无电离层(ionospheric free, IF)组合与宽巷(wide lane, WL)组合,利用惯导短时高精度信息代替伪距消除站星几何距离,结合历元间差、星间差等建立惯导辅助的 IF 组合模型和惯导辅助的 WL 组合模型。惯导辅助的 IF 组合模型不受电离层延迟影响,但无法探测特殊比例周跳,惯导辅助的 WL 组合模型波长较长,却无法探测双频等周周跳,两者的综合使用实现了优势互补。实验结果表明,该方法不仅能有效探测出各种大、小、双频等周和特殊比例周跳,而且在一定卫星信号中断时间内能实现周跳瞬时校正。

关键词:IF 组合;WL 组合;精密单点定位;惯性导航系统;周跳探测与修复

中图分类号:P228 **文献标志码:**A

全球定位系统(global positioning system, GPS)与惯性导航系统(inertial navigation system, INS)的融合,弥补了 GPS 卫星信号受环境影响的脆弱性缺陷。目前,差分 GPS/INS 组合正广泛应用于航空摄影测量和陆地移动测量领域^[1-3]。然而,受限于差分定位基站的距离限制,差分 GPS/INS 大范围测量应用需投入大量人力、物力和财力构建基站。精密单点定位(precise point positioning, PPP)与 INS 的组合方式,在大范围应用中体现出了很大优势,它无需地面控制点,可对大范围进行监测。但 PPP 收敛时间较长,一旦在测量过程中发生周跳,则需数十分钟时间重新收敛,这对工程应用来说是不可接受的。

为解决 PPP 周跳问题,文献[4]提出利用无几何距离组合和 Melbourne-Wübbena 组合相结合的 TurboEdit 方法去探测和修复周跳;文献[5-6]为解决电离层快速变化问题,改进了 Tur-

boEdit 方法。文献[7]基于宽巷(wide lane, WL)和无几何距离组合,运用历元间差分模型实现实时 PPP 周跳瞬时校正;文献[8]通过预测电离层和对流层延迟信息,加快 GPS 卫星信号中断后模糊度的固定;文献[9]同样借助大气层延迟预测信息,运用分级方法修复双频 PPP 周跳。相对于伪距而言,精度较高的多普勒观测值也被用于周跳的探测与修复,以增加冗余信息^[10-11]。此外,还有一些学者利用多频 GNSS 信号探测和修复周跳^[12-14],但目前主流的双频 GNSS 接收机仍具有较高的可用性。

在 GPS/INS 组合方面,文献[15]基于宽巷组合,提出运用 INS 信息辅助 GPS 周跳探测与修复;文献[16]在运用 INS 信息辅助 GPS 周跳探测时,对周跳探测阈值机理进行了详细分析;文献[17]结合惯导预测信息,运用累积和方法探测周跳。此外,文献[18]通过构造不同观测值组合,运

用惯导信息辅助 GPS 周跳自适应探测。以上这些方法均利用惯导信息辅助周跳探测,但它们只针对双差载波观测值,并不适用于 PPP/INS 组合。为此,文献[19]针对非差载波相位观测值,采用宽巷和超宽巷组合,结合 INS 信息进行周跳探测,并对宽巷和超宽巷组合联立方程求解周跳;文献[20]使用 INS 辅助星间单差相位信息与星间单差电离层残差作为周跳修复量,通过取整方法进行修复;文献[21]运用 INS 信息辅助周跳探测时,充分考虑卫星几何分布形状并选择不固定参考卫星进行处理。

本文基于无电离层组合 (ionospheric free, IF) 和 WL 组合方式,提出了一种 INS 辅助的 PPP 周跳探测与修复方法。该方法通过利用 INS 短时高精度信息,结合精密星历信息,消除周跳探测模型中几何位置关系,通过相邻历元间差、星间差以及电离层延迟变化等方法,建立起 INS 辅助 PPP 的无电离层组合模型 (INS-aided ionospheric-free model, IF-INS) 和宽巷组合模型 (INS-aided wide-lane model, WL-INS)。IF-INS 模型对特殊比例周跳 (如 60/77) 不太敏感,但可有效识别出双频等周周跳;WL-INS 探测模型无法探测出双频等周周跳,却能有效探测出特殊比例周跳。本文将 IF-INS 与 WL-INS 两组探测模型进行组合,实现对 PPP 中各类周跳的有效探测与修复。

1 INS 辅助周跳探测与修复

INS 辅助 PPP 周跳探测与修复方法是基于 IF 与 WL 组合,利用惯导短时高精度位置信息,结合精密星历产品,消除 PPP 定位方程中的几何位置关系;通过历元间差、星间差、电离层延迟变化模型等方法,共同建立 INS 辅助 PPP 的无电离层组合模型和宽巷组合模型,最终实现周跳发生后模糊度快速重新收敛。

1.1 INS 辅助的 IF 周跳探测模型 (IF-INS)

PPP 原始观测方程通常可写为:

$$L_i = \rho + c(dt_r - dT^s) + T - I_i + \lambda_i N_i + \lambda_i (b_r - b^s) + \epsilon(L_i) \tag{1}$$

$$P_i = \rho + c(dt_r - dT^s) + T + I_i + \lambda_i (d_r - d^s) + \epsilon(P_i) \tag{2}$$

式中, L_i 和 P_i 分别表示原始相位观测量和伪距观测量; ρ 为接收机至卫星间的几何距离; c 为真空中光速; dt_r 和 dT^s 分别表示接收机端与卫星端钟差; T 为对流层延迟; I_i 为电离层延迟; λ_i 和 N_i 分别表示波长和模糊度; b_r 和 b^s 分别表示接收机

端与卫星端相位硬件延迟; d_r 和 d^s 分别表示接收机端与卫星端码硬件延迟; ϵ 为相位或伪距观测噪声; i 表示频率。使用精密星历和钟差产品消除卫星轨道与钟误差,视码硬件延迟由相应产品修正,相位硬件延迟由模糊度吸收,其他系统误差如天线相位中心偏差、相位缠绕、相对论效应、固体潮、大洋负荷改正以及地球自转等采用模型修正,修正后的方程可简化为:

$$L_i = \rho + cdt_r + T - I_i + \lambda_i N_i + \epsilon(L_i) \tag{3}$$

$$P_i = \rho + cdt_r + T + I_i + \epsilon(P_i) \tag{4}$$

由式(3),相位 IF 组合测量方程可写为:

$$L_{IF} = \rho + cdt_r + T + \lambda_{IF} N_{IF} + \epsilon(L_{IF}) \tag{5}$$

式中, L_{IF} 表示 IF 组合相位观测量; λ_{IF} 表示 IF 组合波长; N_{IF} 表示 IF 组合模糊度; $\epsilon(L_{IF})$ 表示 IF 组合相位观测噪声。

利用 INS 提供的接收机短时高精度位置信息 ($X_{INS}, Y_{INS}, Z_{INS}$),结合 IGS 精密轨道产品提供的卫星位置 (X^s, Y^s, Z^s),估计站星几何距离,即:

$$\rho = \rho_{INS} + \epsilon_{INS} \tag{6}$$

其中,

$$\rho_{INS} = \sqrt{(X^s - X_{INS})^2 + (Y^s - Y_{INS})^2 + (Z^s - Z_{INS})^2}$$

为惯导估计站星几何距离; ϵ_{INS} 为惯导估计站星几何距离误差。

将式(6)代入式(5),消除站星几何距离 ρ ,得到包含 INS 位置信息的 IF 组合观测量:

$$L_{IF-INS} = L_{IF} - \rho_{INS} = cdt_r + T + \lambda_{IF} N_{IF} + \epsilon(L_{IF}) + \epsilon_{INS} \tag{7}$$

式中, L_{IF-INS} 表示消除站星几何距离的 IF 组合观测量。

对连续历元观测值作历元间差分,对低动态接收机而言,若没有强烈的天气变化或剧烈的高层变化,对流层延迟变化缓慢^[22-24],当运用模型处理和参数估计后,对流层延迟可以被忽略。进而,经历元间差分后 IF 组合观测方程为:

$$\delta L_{IF-INS} = c\delta dt_r + \lambda_{IF} \delta N_{IF} + \delta \epsilon(L_{IF}) + \delta \epsilon_{INS} \tag{8}$$

式中, δ 表示历元间差分; δL_{IF-INS} 表示历元差 IF 组合观测量; δdt_r 表示历元差接收机端钟差; δN_{IF} 表示历元差模糊度,即为 IF 组合周跳; $\delta \epsilon(L_{IF})$ 为历元差 IF 组合相位观测噪声; $\delta \epsilon_{INS}$ 为历元差惯导估计站星几何距离误差。

选择合适的参考卫星,进行星间差分,消除接收机端误差:

$$\Delta \delta L_{IF-INS} = \lambda_{IF} \Delta \delta N_{IF} + \Delta \delta \epsilon(L_{IF}) + \Delta \delta \epsilon_{INS} \tag{9}$$

且

$$\begin{cases} \lambda_{\text{IF}} \Delta \delta N_{\text{IF}} = \alpha \lambda_1 \Delta n_1 - \beta \lambda_2 \Delta n_2 \\ \alpha = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, \beta = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中, Δ 表示星间差; $\Delta \delta L_{\text{IF-INS}}$ 为 INS 辅助的 IF 组合周跳探测量; $\Delta \delta N_{\text{IF}}$ 为星间差 IF 组合周跳; $\Delta \delta \epsilon(L_{\text{IF}})$ 为双差 IF 组合相位观测噪声; $\Delta \delta \epsilon_{\text{INS}}$ 为双差后的惯导估计站星几何距离误差; Δn_1 为载波 L_1 频率上的星间差周跳; Δn_2 为载波 L_2 频率上的星间差周跳; λ 为载波相位波长; f 为载波相位频率。在 IF-INS 探测模型中, 周跳探测量不受电离层的影响, 借助惯导短时高精度信息, 可实现较高精度地探测周跳。若参考卫星发生周跳, 往往导致其他卫星均发生周跳, 此时需更换参考卫星重新进行周跳探测。

1.2 INS 辅助的 WL 周跳探测模型(WL-INS)

由式(3), WL 组合测量方程可写为:

$$L_{\text{WL}} = \rho + cdt_r + T - I_{\text{WL}} + \lambda_{\text{WL}} N_{\text{WL}} + \epsilon(L_{\text{WL}}) \quad (11)$$

式中, 下标 WL 表示宽巷组合; L_{WL} 表示 WL 组合相位观测测量; I_{WL} 表示 WL 组合电离层延迟; λ_{WL} 表示 WL 组合波长; N_{WL} 表示 WL 组合模糊度; $\epsilon(L_{\text{WL}})$ 表示 WL 组合相位观测噪声。

与 IF-INS 探测模型建立方法类似, 利用 INS 短时高精度信息与精密星历, 消除 WL 组合中站星几何位置关系; 通过历元间差和星间差消除对流层延迟误差、电离层延迟误差、接收机钟差等参数, 建立 INS 辅助的 WL 组合周跳探测模型:

$$\Delta \delta L_{\text{WL-INS}} = \lambda_{\text{WL}} \Delta \delta N_{\text{WL}} + \Delta \delta \epsilon(L_{\text{WL}}) + \Delta \delta \epsilon_{\text{INS}} \quad (12)$$

且

$$\Delta \delta N_{\text{WL}} = \Delta n_1 - \Delta n_2 \quad (13)$$

式中, $\Delta \delta L_{\text{WL-INS}}$ 为 INS 辅助 PPP 的 WL 组合周跳探测量; $\Delta \delta N_{\text{WL}}$ 为星间差 WL 组合周跳; $\Delta \delta \epsilon(L_{\text{WL}})$ 为双差 WL 组合相位观测噪声; $\Delta \delta \epsilon_{\text{INS}}$ 为双差后的惯导估计站星几何距离误差。

值得注意的是, WL 组合中的电离层延迟项: 在电离层平稳状态时, 通过历元间差分便可将其消除^[25-28]; 当电离层快速变化或 GPS 信号长时间中断时, 通过拟合方法可得精确的电离层延迟变化, 以此忽略其影响^[8-9]。

1.3 INS 辅助模糊度快速收敛

结合惯导辅助的 IF 组合周跳探测量和 WL 组合周跳探测量, 忽略误差项部分, 联合求解可得 L_1 与 L_2 上的实数周跳 Δn_1 、 Δn_2 :

$$\begin{cases} \Delta n_1 = \frac{\beta \lambda_2 \times \Delta \delta L_{\text{WL-INS}} / \lambda_{\text{WL}} - \Delta \delta L_{\text{IF-INS}}}{\beta \lambda_2 - \alpha \lambda_1} \\ \Delta n_2 = \frac{\alpha \lambda_1 \times \Delta \delta L_{\text{WL-INS}} / \lambda_{\text{WL}} - \Delta \delta L_{\text{IF-INS}}}{\beta \lambda_2 - \alpha \lambda_1} \end{cases} \quad (14)$$

考虑残余误差的影响, 对上述所求得的周跳 Δn_1 、 Δn_2 分别取整, 若取整精度高且取整周跳通过了有效性检验^[16,19], 模糊度便可直接恢复。否则, 将所得到的实数周跳结合前一历元时刻的模糊度信息, 得到当前历元模糊度的估计值, 以此作为模糊度收敛的初始条件。相对于运用码伪距信息辅助模糊度初始化方法而言, 由于 INS 信息短时精度高, 不受码噪声影响, INS 辅助方法将大大缩短模糊度重新收敛的时间。

2 精度分析

在式(9)表示的 IF-INS 探测模型和式(12)表示的 WL-INS 探测模型中, 双差相位观测噪声 $\Delta \delta \epsilon(L_{\text{IF}})$ 和 $\Delta \delta \epsilon(L_{\text{WL}})$ 数值较小, 相对于惯导估计站星几何距离误差而言可被忽略。惯导估计站星几何距离误差是惯导估计接收机位置误差在接收机至卫星方向向量上的投影, 双差后的惯导估计站星几何距离误差 $\Delta \delta \epsilon_{\text{INS}}$ 可表示为^[29-30]:

$$\Delta \delta \epsilon_{\text{INS}} = \mathbf{e}^p \cdot \mathbf{dr} - \mathbf{e}^q \cdot \mathbf{dr} = (\mathbf{e}^p - \mathbf{e}^q) \cdot \mathbf{dr} \quad (15)$$

式中, \mathbf{e}^p 表示接收机至当前卫星的方向向量; \mathbf{e}^q 表示接收机至参考卫星的方向向量; \mathbf{dr} 表示惯导估计接收机位置误差向量。

结合矢量计算法则, 由式(15)可得^[30]:

$$|\Delta \delta \epsilon_{\text{INS}}| = \sqrt{2 - 2\cos\theta} \cdot |\mathbf{dr}| \quad (16)$$

式中, θ 角为方向向量 \mathbf{e}^p 与方向向量 \mathbf{e}^q 的夹角。

而 INS 估计接收机位置误差为^[31-32]:

$$|\mathbf{dr}| = \sqrt{(g b_g \frac{t^3}{6})^2 + (b_a \frac{t^2}{2})^2} \quad (17)$$

式中, b_g 和 b_a 分别表示陀螺、加速度计零偏, 它们受前一时刻组合系统滤波更新校正; g 为重力加速度; t 为惯导独立导航时长。

由于惯导估计接收机位置误差随中断时间延长而显著增大, 以典型战术级惯导为例(陀螺标称零偏 $0.3^\circ/\text{h}$, 加速度计标称零偏 $100 \mu\text{g}$), 在 GPS 卫星信号中断时间小于 10 s 时, 若卫星截止高度角设为 15° , 接收机至参考卫星与接收机至其他卫星方向向量间夹角最大为 150° , 此时惯导估计站星几何距离误差 $\Delta \delta \epsilon_{\text{INS}}$ 最大为 0.09 m, 小于组合周跳探测量阈值, 满足惯导辅助周跳探测对惯性器件精度的要求。

3 车载实验与数据分析

本文利用一套车载 GPS/INS 装置进行实验,车载平面轨迹如图 1 所示。数据采集于 2013 年 7 月 2 日北京郊外,使用测地级 GPS 接收机和某型国产光纤惯性测量单元(inertial measurement unit,IMU)。GPS 接收机与 IMU 采样率分别为 10、200 Hz,陀螺零偏 $0.3^{\circ}/\text{h}$,加速度计零偏 $100\text{ }\mu\text{g}$,车载数据有效时长为 50 min。在整个测量过程中,可见卫星高度角变化如图 2 所示,PRN03 号卫星被作为参考卫星,因其仰角较高且未发生周跳。

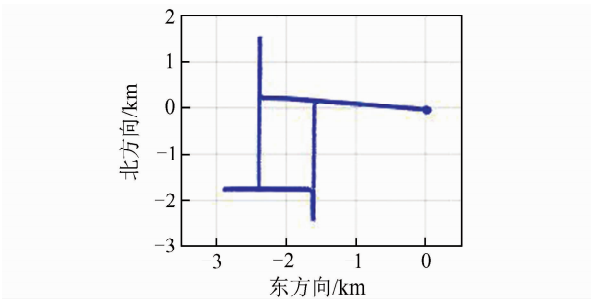


图 1 车载平面轨迹图
Fig. 1 Plane Trajectory of the Car

以 PRN19 号卫星为例,惯导辅助无电离层组合探测量 $\Delta\delta L_{\text{IF-INS}}$ 和宽巷组合探测量 $\Delta\delta L_{\text{WL-INS}}$ 如图 3 所示,可以得出:① $\Delta\delta L_{\text{IF-INS}}$ 和 $\Delta\delta L_{\text{WL-INS}}$ 周跳探测量数值大部分在 $\pm 0.03\text{ m}$ 以内,标准差分别为 0.004 3 、 0.005 4 m ;②PRN19 号卫星周跳探测量在测试期间未发现明显的变化,即表明该颗卫星未发生周跳现象。

为验证 INS 辅助方法探测周跳的能力,本文

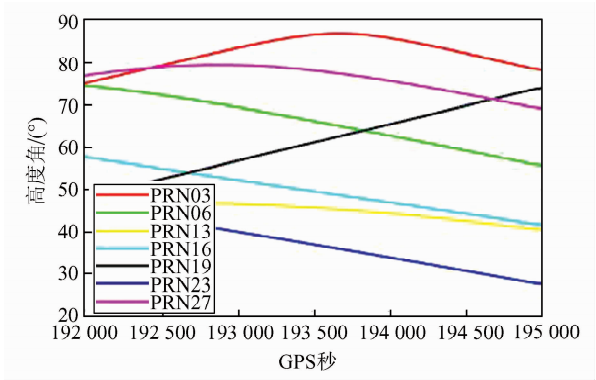


图 2 可见卫星高度角变化图
Fig. 2 Elevation Angles of the Visible Satellites

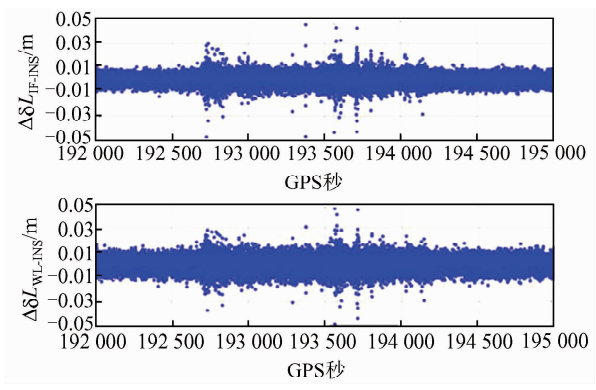


图 3 PRN19 号卫星各探测量变化图
Fig. 3 Decision Variables for PRN19

对 PRN19 号卫星人为引入 200 s 的等时间间隔周跳 14 组(包括大、小、双频等周和特殊比例类型),运用 IF-INS 和 WL-INS 周跳探测模型分别进行周跳探测,探测结果及探测量变化分别如表 1、图 4 所示。其中各周跳探测量阈值以 3 倍中误差为标准,并充分考虑各种误差的影响,均取为 0.3 m 。

表 1 PRN19 号卫星周跳探测测试结果
Tab. 1 Detected Values of Simulated Scenario for PRN19

序号	GPS 秒	L_1 上 引入周跳	L_2 上 引入周跳	$\Delta\delta L_{\text{IF-INS}}$ /m	$\Delta\delta L_{\text{WL-INS}}$ /m	求解周跳 N_1	求解周跳 N_2
1	192 200	1	0	0.487	0.868	0.99	-0.01
2	192 400	0	2	-0.759	-1.729	-0.02	1.99
3	192 600	2	1	0.591	0.860	2.00	1.01
4	192 800	3	1	1.078	1.723	3.03	1.03
5	193 000	3	3	0.316	-0.006 [#]	2.98	2.99
6	193 200	2	4	-0.543	-1.729	2.00	4.01
7	193 400	4	3	0.812	0.870	4.03	3.02
8	193 600	4	5	0.048 [#]	-0.866	3.99	4.99
9	193 800	5	3	1.287	1.721	4.99	2.99
10	194 000	6	4	1.394	1.718	5.99	4.01
11	194 200	7	0	3.393	6.038	6.99	-0.01
12	194 400	7	9	-0.006 [#]	-1.725	7.01	9.01
13	194 600	8	7	1.236	0.865	8.02	7.01
14	194 800	9	7	1.722	1.728	9.03	7.02

注: [#] 号标记表示未探测出的周跳处

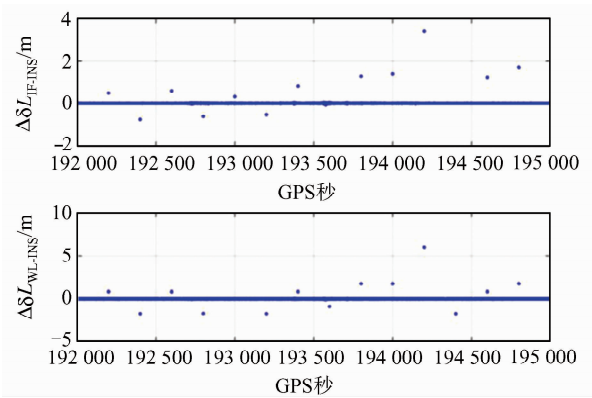


图 4 加入模拟周跳后 PRN19 号卫星
各探测量变化图
Fig. 4 Decision Variables for PRN19 with
Simulated Cycle Slips

可以得出:① IF-INS 探测模型探测精度很高,对各种大、小、双频等周周跳非常敏感,但无法探测出特殊比例周跳(如 4/5、7/9 等);WL-INS 探测模型对双频等周周跳(如 3/3)不敏感,却能很好地探测出特殊比例周跳。因此,本文通过综合此两种模型,实现了对所引入 14 组周跳的成功探测。②通过结合 $\Delta\delta L_{IF-INS}$ 和 $\Delta\delta L_{WL-INS}$ 周跳探测量,成功求解出所有实数周跳,且周跳取整精度均在 ± 0.1 周以内,进而实现了在连续观测条件下周跳单历元瞬时校正。

为考察 INS 漂移对周跳探测的影响,在原始数据 30 个不同时刻处分别模拟 0、2、5、10、15 s 信号中断,并在中断后对除参考卫星外的所有卫星人为引入随机周跳。实验结果表明,对于每一类中断所引入的 180 组周跳,运用惯导辅助方法均能成功探测出,且周跳修复率分别为 100%、100%、96.4%、78.6%、64.3%。

以 193 250 秒时刻为例,GPS 卫星信号中断、周跳类型以及探测结果如表 2 至表 6 所示,惯导估计站星几何距离误差如图 5 所示。可以得出:

1) 由于卫星方位不同,惯导估计各颗卫星的站星几何距离误差不太一致,但整体上随着中断时间的延长而逐渐增大。

2) 在信号中断 0、2、5 s 时,所有周跳均被成功探测与修复;在信号中断 10 s 时,所有周跳均被成功探测,但一组周跳修复精度较差;当信号中断 15 s 时,3 组周跳修复精度较差、一组周跳求解错误。这是由于当中断时间继续延长时,受惯导累积误差影响,INS 辅助方法的探测与修复能力下降。但在一定中断时间限制内,惯导辅助方法仍然有效。

表 2 所有卫星加入 0 s 中断、引入周跳的探测结果

Tab. 2 Resolution of Real Cycle Slips with 0 s
Signal Interruption

PRN 人为引入周跳		0 s 中断的周跳修复				
号	n_1	n_2	$\Delta\delta L_{IF-INS}$	$\Delta\delta L_{WL-INS}$	N_1	N_2
G06	59	-86	61.044	124.978	58.98	-85.96
G13	-24	-6	-9.364	-15.518	-24.00	-6.00
G16	37	-47	35.660	72.396	36.97	-46.99
G19	-82	40	-54.825	-105.154	-82.01	39.94
G23	8	-11	8.027	16.378	7.98	-11.01
G27	12	-78	35.259	77.577	12.00	-77.97

表 3 所有卫星加入 2 s 中断、引入周跳的探测结果

Tab. 3 Resolution of Real Cycle Slips with 2 s
Signal Interruption

PRN 人为引入周跳		2 s 中断的周跳修复				
号	n_1	n_2	$\Delta\delta L_{IF-INS}$	$\Delta\delta L_{WL-INS}$	N_1	N_2
G06	71	-21	42.330	79.308	71.02	-20.95
G13	-74	-55	-15.072	-16.353	-73.96	-54.99
G16	-66	69	-58.003	-116.340	-65.93	69.00
G19	-29	-30	-2.724	0.866	-29.02	-30.02
G23	39	63	-4.888	-20.683	38.98	62.97
G27	-2	6	-3.224	-6.879	-1.97	6.00

表 4 所有卫星加入 5 s 中断、引入周跳的探测结果

Tab. 4 Resolution of Real Cycle Slips with 5 s
Signal Interruption

PRN 人为引入周跳		2 s 中断的周跳修复				
号	n_1	n_2	$\Delta\delta L_{IF-INS}$	$\Delta\delta L_{WL-INS}$	N_1	N_2
G06	34	-67	41.775	87.068	34.05	-66.92
G13	23	-30	22.489	45.714	23.07	-29.94
G16	-38	4	-19.886	-36.168	-37.83	4.11
G19	63	39	15.778	20.666	62.90	38.93
G23	-92	-37	-30.605	-47.401	-92.0	-37.07
G27	20	17	3.279	2.600	20.01	17.00

表 5 所有卫星加入 10 s 中断、引入周跳的探测结果

Tab. 5 Resolution of Real Cycle Slips with 10 s
Signal Interruption

PRN 人为引入周跳		10 s 中断的周跳修复				
号	n_1	n_2	$\Delta\delta L_{IF-INS}$	$\Delta\delta L_{WL-INS}$	N_1	N_2
G06	74	-90	69.856	141.392	74.16	-89.82
G13	86	-77	70.779	140.560	86.20	-76.81
G16	-31	-86	17.521	47.479	-30.59*	-85.66*
G19	45	31	10.060	12.033	44.79	30.83
G23	-49	85	-55.832	-115.497	-49.07	84.87
G27	100	-10	52.236	94.837	100.06	-9.93

注: * 号标记表示周跳估计值取整精度大于 ± 0.25 周

表 6 所有卫星加入 15 s 中断、引入周跳的探测结果

Tab. 6 Resolution of Real Cycle Slips with 15 s
Signal Interruption

PRN 人为引入周跳		10 s 中断的周跳修复				
号	n_1	n_2	$\Delta\delta L_{IF-INS}$	$\Delta\delta L_{WL-INS}$	N_1	N_2
G06	-99	-3	-46.765	-82.675	-98.70*	-2.81
G13	76	-60	59.545	117.317	76.34*	-59.72*
G16	87	20	34.726	57.880	87.67#	20.54#
G19	64	88	-2.272	-20.730	63.64*	87.68*
G23	6	-81	33.468	74.984	5.87	-81.09
G27	7	40	-11.683	-28.407	7.09	40.03

注: * 号标记表示周跳估计值取整精度大于 ± 0.25 周; # 号标记表示周跳估计错误

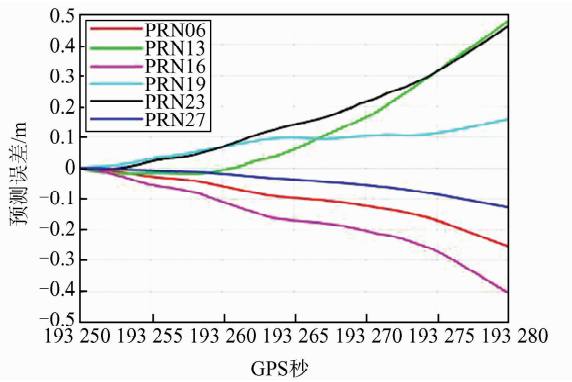


图 5 惯导估计站星几何距离误差变化图
Fig. 5 INS-Predicted Geometric Range Error

4 结 语

本文针对 PPP/INS 组合系统中载波相位观测值易发生周跳问题,提出了一种 INS 辅助的 PPP 周跳探测与修复方法。该方法基于 IF 和 WL 组合方式,借助惯导短时高精度信息,结合历元间差、星间差、电离层延迟变化模型等方法,建立 IF-INS 和 WL-INS 周跳探测模型,并运用模型间的互补特性,实现对各类周跳的探测。通过实验分析可知:①在连续历元时刻内,该方法对大、小、双频等周和特殊比例周跳敏感,能实现对任何种类周跳的单历元瞬时校正。②在 GPS 卫星信号 0、2、5、10、15 s 中断时,利用本文传感器配置能实现对各类随机周跳的成功探测,且周跳修复率分别为 100%、100%、96.4%、78.6%、64.3%。③惯导估计站星几何距离误差是影响惯导辅助周跳探测方法的关键因素,它与惯性传感器精度水平、卫星信号中断时间、接收机至参考卫星与接收机至其他卫星方向向量间夹角有关。随着中断时间延长、卫星间夹角增大,惯导估计站星几何距离误差也随之增大,因此在传感器配置固定和信号中断时长不可控的条件下,选择合适的参考卫星有利于减小卫星间夹角,提高探测精度。

参 考 文 献

[1] Zhang Qiuzhao, Zhang Shubi, Liu Zhiping, et al. Tightly-Coupled GPS/SINS Integrated System Measurement Model Based on Double-Difference Pseudo-Range/Pseudo-Range Rate [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(12): 1 690-1 694 (张秋昭, 张书毕, 刘志平, 等. 基于双差伪距/伪距率的 GPS/SINS 紧组合导航[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2015, 40 (12): 1 690-1 694)

[2] Li Zengke, Wang Jian, Gao Jingxiang. The Apply of Precise Point Positioning in GPS/INS Integrated Navigation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(1): 48-51 (李增科, 王坚, 高井祥. 精密单点定位在 GPS/INS 组合导航中的应用[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2013, 38(1): 48-51)

[3] Lu Yu, Hu Rui, Yang Yunchun. A Low Cost GPS/INS Tightly-Coupled Navigation System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 481-485 (鲁郁, 胡锐, 杨云春. 一种低成本 GPS/INS 紧耦合组合导航系统[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2011, 36(4): 481-485)

[4] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199-202

[5] Liu Z. A New Automated Cycle Slip Detection and Repair Method for a Single Dual-Frequency GPS Receiver[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(3): 171-183

[6] Cai C, Liu Z, Xia P, et al. Cycle Slip Detection and Repair for Undifferenced GPS Observations Under High Ionospheric Activity [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 247-260

[7] Banville S, Langley R B. Improving Real-Time Kinematic PPP with Instantaneous Cycle-Slip Correction[C]. ION GNSS, GA, USA, 2009

[8] Geng J, Meng X, Dodson A H, et al. Rapid Reconvergences to Ambiguity-Fixed Solutions in Precise Point Positioning [J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(12): 705-714

[9] Zhang X, Li X. Instantaneous Re-initialization in Real-Time Kinematic PPP with Cycle Slip Fixing [J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(3): 315-327

[10] Chai Yanju, Yang Rengui, Zhang Baocheng. Cycle-slip Automatic Detection and Processing Strategy for Dynamic PPP[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(5): 433-439 (柴艳菊, 阳仁贵, 张宝成. 动态 PPP 定位中周跳自动探测与处理策略 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 433-439)

[11] Ding Wenwu, Ou Jikun. Instantaneous Re-initialization of Real Time Kinematic PPP by Adding Doppler Observation[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(6): 795-800 (丁文武, 欧吉坤. 增加 Doppler 观测值实现实时动态 PPP 快速重新初始化[J]. 宇航学报, 2013, 34(6): 795-800)

[12] Lacy M C, Reguzzoni M. Real-Time Cycle Slip Detection in Triple-Frequency GNSS[M]. New York: Springer-Verlag, 2012

[13] Cao Xinyun, Wang Jian. Cycle-Slip Detection and Repair Using GPS Triple-Frequency Undifferenced

- Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(4): 450-456 (曹新运, 王坚. GPS 三频非差观测值探测与修复周跳[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(4): 450-456)
- [14] Sun Baoqi, Ou Jikun, Sheng Chuazhen, et al. Optimal Multi-frequency Data Combination for Compass Cycle Slip Detection and Reparation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(10): 157-160 (孙保琪, 欧吉坤, 盛传贞, 等. 一种适于 Compass 周跳探测的三频数据优化组合[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(10): 157-160)
- [15] Colombo O L, Bhapkar U V. Inertial-Aided Cycle-Slip Detection/Correction for Precise, Long-Base-line Kinematic GPS[C]. ION GPS, Nashville, TN, USA, 1999
- [16] Altmayer C. Enhancing the Integrity of Integrated GPS/INS Systems by Cycle Slip Detection and Correction[C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn, MI, USA, 2000
- [17] Lee H K, Wang J C R. Effective Cycle Slip Detection and Identification for High Precision GPS/INS Integrated Systems[J]. *Journal of Navigation*, 2003, 56(3): 475-486
- [18] Han Houzeng, Wang Jian, Li Zengke. Inertial Aided Kinematic GPS Cycle Slip Detection and Correction for GPS/INS Tightly Coupled System[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(8): 848-857 (韩厚增, 王坚, 李增科. GPS/INS 紧组合的 INS 辅助周跳探测与修复[J]. 测绘学报, 2015, 44(8): 848-857)
- [19] Du S, Gao Y. Inertial Aided Cycle Slip Detection and Identification for Integrated PPP GPS and INS [J]. *Sensors*, 2012, 12(11): 14 344-14 362
- [20] 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)
- [21] Younsil K, Junesol S, Changdon K, et al. GPS Cycle Slip Detection Considering Satellite Geometry Based on TDCP/INS Integrated Navigation [J]. *Sensors*, 2015, 15(10): 336-365
- [22] Gregorius T L H, Blewitt G. Modeling Weather Fronts to Improve GPS Heights: A New Tool for GPS Meteorology[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B7): 261-279
- [23] Shan S, Bevis M, Kendrick E, et al. Kinematic GPS Solutions for Aircraft Trajectories: Identifying and Minimizing Systematic Height Errors Associated with Atmospheric Propagation Delays[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23): 315-324
- [24] Zhang Xiaohong, Zhu Feng, Li Pan, et al. Zenith Troposphere Delay Interpolation Model for Regional CORS Network Augmented PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6): 679-683 (张小红, 朱锋, 李盼, 等. 区域 CORS 网络增强 PPP 天顶对流层延迟内插建模[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(6): 679-683)
- [25] Dai L, Wang J, Rizos C, et al. Predicting Atmospheric Biases for Real-Time Ambiguity Resolution in GPS/GLONASS Reference Station Networks [J]. *Journal of Geodesy*, 2003, 76(11/12): 617-628
- [26] Song Weiwei, Shi Chuang, Yao Yibin, et al. Ionosphere Delay Processing Methods and Positioning Precision of Single Frequency Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(7): 778-781 (宋伟伟, 施闯, 姚宜斌, 等. 单频精密单点定位电离层改正方法和定位精度研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(7): 778-781)
- [27] Liu J, Chen R, Wang Z, et al. Spherical Cap Harmonic Model for Mapping and Predicting Regional TEC[J]. *GPS Solutions*, 2011, 15(2): 109-119
- [28] Shi C, Gu S, Lou Y, et al. An Improved Approach to Model Ionospheric Delays for Single-Frequency Precise Point Positioning [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(12): 698-708
- [29] Xiao Kai, Sun Fuping, Wang Haoyuan, et al. Inertial Aided Triple-Frequency Cycle Slip Detection and Repair of BDS/INS Tightly-Coupled Integration[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2018, 26(2): 215-222 (肖凯, 孙付平, 王浩源, 等. 北斗/INS 紧组合的惯性辅助三频周跳探测和修复[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(2): 215-222)
- [30] Wang L, Gan Y, Wei E, et al. INS-Aided Single-Frequency Cycle-Slip Detection for Real-Time Kinematic GNSS[C]. China Satellite Navigation Conference, Harbin, China, 2018
- [31] Chiang K W, Duong T T, Liao J K. The Performance Analysis of a Real-Time Integrated INS/GPS Vehicle Navigation System with Abnormal GPS Measurement Elimination [J]. *Sensors*, 2013, 13(8): 10 599-10 622
- [32] Titterton D H, Weston J L. Strapdown Inertial Navigation Technology [M]. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004

An INS-Aided Cycle Slip Detection and Repair Method Based on
IF and WL Combinations

LI Leilei¹ YANG Sheng^{2,1} LIU Jingbin² SUN Hongxing² DING Xuewen³ WU Yu¹
REN Chunhua⁴ PENG Liang¹ XIE Changcheng¹

1 College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Qianxun Spatial Intelligence Inc., Shanghai 200438, China

4 Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: Cycle slips often occur in carrier phase observations due to the problem of the obstruction, low signal-to-noise ratio, or high receiver dynamics. An effective INS(inertial navigation system)-aided cycle slip detection and repair method is presented, which is based on PPP/INS integrated system. It utilizes high-precision INS information instead of a pseudorange to remove the satellite-receiver geometric range in the wide-lane and ionospheric-free phase combinations, cooperates with satellite and epoch differential processing, and creates INS-aided wide-lane model and INS-aided ionospheric-free model. The INS-aided ionospheric-free model is unaffected by the dramatic changes in the ionosphere but cannot detect the special pairs of cycle slips. The INS-aided wide-lane model has a long wavelength. However, it is insensitive to the equal cycle slips on dual frequencies. So their combination can achieve mutual complementary advantages. The results show that this method can effectively detect and repair various types of cycle slips. Moreover, when it comes to the cycle slip after a GPS interruption, the method can realize the instantaneous correction.

Key words: IF combination; WL combination; PPP; INS; cycle slip detection and repair

First author: LI Leilei, PhD, lecturer, specializes in GPS/INS positioning and orientation system (POS). E-mail: lill@cqu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41874031; the Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology, Nos. cstc2016jcyjA0300, cstc2018jcyjAX0127; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2018CDXYHK0016; the Technology Innovation Program of Hubei Province, No. 2018AAA070; the Natural Science Fund of Hubei Province, No. 2018CFA007.